



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ANTTI HARALA
AIKAVÄLI- JA TAAJUUSMITTAUSLAITTEISTON
MODERNISOINTI

Diplomityö

Tarkastajat: prof. Jouko Halttunen
prof. Karri Palovuori

Tarkastajat ja aihe hyväksytty Tieto-
ja sähkötekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 9.10.2013

Tiivistelmä

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Harala, Antti: Aikaväli- ja taajuusmittauslaitteiston modernisointi

Diplomityö: 61 sivua

Huhtikuu 2014

Pääaine: Mittaustekniikka

Tarkastajat: prof. Jouko Halttunen ja prof. Karri Palovuori

Avainsanat: Ilmavoimien Materiaalilaitos, K013, aikaväli, taajuus, stabiilisuus, Allan-deviaatio, GPSDO, taajuusnormaali

Tämä diplomityö kuvaa uuden aikaväli- ja taajuusmittauslaitteiston suunnittelua ja rakentamista Ilmavoimien Materiaalilaitoksen akkreditoidulle K013-kalibrointi-laboratoriolle. Kalibrointilaboratorion aikaisempi laitteisto on ikääntynyt, mutta laboratoriolle ei ole tarvetta parantaa akkreditoitua mittauskykyä.

Työn teoriaosassa esitellään laboratorion uusien ja vanhojen atomikellojen toiminnan ymmärtämisen kannalta tärkeät kvanttimekaaniset ilmiöt ja GPS-signaaliin lukitun taajuusnormaalin toimintaperiaate. Lisäksi esitellään atomikellojen stabiilisuuden analyysiin käytettävä Allan-varianssi. Allan-varianssia tarvitaan, koska atomikellojen taajuuden vaihtelun keskiarvo ei suppene ja tavallinen varianssi ei sovellu vaihtelun analyysiin.

Soveltavassa osassa kuvaillaan vanhan järjestelmän toiminta ja suunnitellaan uusi laitteisto. Aikaisemmin K013-laboratorion käyttönormaalina on toiminut rubidium-87:n ylihieneen siirtymään perustuva atomikello. Käyttönormaali on kalibroitu kuukausittain käyttäen GPS-lukittua referenssinormaalia. Aikavälin ja taajuuden mittausrakenteina on käytetty vaihevertaajaa, piirturia ja taajuuslaskimia, joiden taajuusreferenssinä käyttönormaali on toiminut. Vaihevertaajalla ja piirturilla on mitattu 100 kHz sekä 1, 5 ja 10 MHz pistetaajuuksia. Aikavälin ja taajuuksien 10 Hz ... 26 GHz mittaamiseen on käytetty taajuuslaskimia. Laitteista uusimisen tarpeessa olivat molemmat rubidiumkaasukennonnormaalit, vaihevertaaja ja piirturi.

Työn kuluessa vanha vaihevertaaja ja piirturi korvataan uudella 5115A-vaihevertaajalla, ja pistetaajuuksien mittaamista varten ohjelmoidaan Labview-sovellus. Käyttönormaali ja referenssinormaali korvataan uusilla atomikelloilla ja järjestelmän suorituskyky analysoidaan. Työn edetessä käy ilmi, että uusi vaihevertaaja toimii virheellisesti eikä laitteella voi myöskään mitata alle 1 MHz taajuuksia. Laitetta ei ehditä huoltaa ennen työn päättymistä.

Työssä todetaan, että uuden järjestelmän suorituskyky riittää akkreditoidun mittauskyvyn säilyttämiseen, pois lukien 100 kHz pistetaajuuden mittaaminen. Lisäksi todetaan, että pistetaajuuksien mittaushjelma lyhentää tarvittavaa mittausaikaa huomattavasti. Saatut tulokset ovat suuntaa antavia, koska suorituskyvyn analyysiin on käytetty virheellisesti toimivaa 5115A vaihevertaajaa. Työssä suositellaan laitteiston arvioinnin uusimista sitten, kun 5115A on huollettu.

Abstract

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Harala, Antti: Modernisation of Time Interval and Frequency Measurement Equipment

Master's thesis: 61 pages

April 2014

Major subject: Measurement technology

Examiners: prof. Jouko Halttunen and prof. Karri Palovuori

Keywords: Finnish Air Force Materiel Command, K013, time interval, frequency, Allan deviation, GPSDO, frequency standard

The Finnish Air Force Materiel Command is in charge of the measuring, maintenance and testing services of the materials related to military aviation. The depot hosts a calibration laboratory accredited by FINAS, with the accreditation code K013. The K013's scope of accreditation covers three fields of calibration: time and frequency, DC and low frequency quantities and mechanical quantities. The two accredited quantities in the time and frequency field of calibration are time interval and frequency. The time interval and frequency measuring equipment in the laboratory is nearing, or has already exceeded, its set service life and updating the equipment has become necessary.

According to a detailed assessment by the laboratory staff, the atomic clocks used as the working and reference standards of the system as well as the recording equipment and the phase detector must be replaced. The main purpose for modernising the equipment is to enable the continuation of the accreditation. At the moment, the laboratory has no need as such to improve the calibration and measurement capability of the time and frequency quantities already granted to it.

First, this thesis describes the quantum mechanical phenomena essential for understanding the operation of atomic clocks as well as the structure of the widely used rubidium gas cell standard and the GPS disciplined oscillator. After this, the thesis explains the specialised statistical tools used for the characterisation of atomic clocks. Finally, the thesis outlines the operation of the old system, the design of the new equipment and provides an assessment of the capacity of the new equipment.

This thesis concludes that the new measurement equipment is capable of maintaining the laboratory's scope of accreditation in all measurement ranges except for the 100 kHz frequency. This is due to the fact that the new phase detector is incapable of measuring frequencies below 1 MHz. Furthermore, the results in this thesis should be considered preliminary as the analysis of the new equipment was performed with the new phase detector which had not passed the verification procedure. The assessment of the new measurement system should be performed again at a later date when the new phase detector has been properly serviced.

Alkusanat

Minut palkattiin harjoittelijaksi Ilmavoimien Materiaalilaitoksen Kalibrointilaboratorioon kesäksi 2013. Tehtäväni oli uusia laboratorion aikaväli- ja taajuusmittauslaitteisto, jonka pohjalta tämä diplomityö on tehty.

Haluan kiittää tarkastajia työn joustavasta etenemisestä. Erikseen kiitos professori Jouko Halttuselle ja avovaimolleni Marille neuvoista diplomityön kirjoitusasuun ja oikeinkirjoituksen suhteen. Työssäni ja opiskelussa minua auttoi Aumalan et al. mainio Mittaussignaalien käsittely -kirja. Sain tukea myös ystäväpiirini perustamasta lopputyöryhmästä, jonka tarkoituksena oli kannustaa tutkinnon loppuvaiheessa olevia ystäviä. Suurin kiitos kuuluu kuitenkin Kalibrointilaboratorion koko henkilökunnalle. Työympäristö oli aivan mahtava.

19. helmikuuta 2014

ANTTI HARALA
antti.harala@iki.fi

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Atomikellon toimintaperiaate	3
2.1	Perustilan ylihieno siirtymä	3
2.2	Magneettinen resonanssi	5
2.3	Optinen pumppaus	6
3	Rubidiumnormaali	8
3.1	Rubidiumkaasukennon normaalin toimintaperiaate	8
3.2	GPS-lukittu oskillaattori	10
4	Oskillaattorin karakterisointi	13
4.1	Tarkkuus	14
4.2	Stabiilisuus	15
5	Allan-varianssi	19
5.1	Teoria	19
5.2	Esimerkki	21
5.3	Lomittainen Allan-varianssi	22
5.4	Allan-deviaatio	23
6	K013-laboratorion vanha järjestelmä	26
6.1	Laitteisto	26
6.2	Mittaustoiminta	27
7	K013-laboratorion uusi järjestelmä	30
7.1	Laitteisto	30
7.2	Uuden järjestelmän suunnittelu	31
7.3	Pistetaajuuksien mittausohjelma	35
7.4	Symmetricom 5115A:han liittyvät ongelmat	37
8	Uuden järjestelmän arviointi	39
8.1	8040C-käyttönormaalin suorituskyky	39
8.2	Taajuuksien 10 Hz ... 26 GHz ja aikavälin mittaus	45
8.3	Pistetaajuuksien mittausohjelman epävarmuus	45
8.4	Huolto ja ylläpito	48
8.5	GPS-lukittu oskillaattori taajuusnormaalina	49
8.6	Järjestelmän toiminta ilman GPS-signaalia	51
9	Johtopäätökset	53

Lähteet	55
Liite A Allan-deviaation epävarmuustaulukot	58
Liite B Laitteiden tärkeimmät spesifikaatiot	59
Liite C 5115A:n verifikaatiotestin pöytäkirja	60
Liite D Matlab-komentosarjat	61

Lyhenteet ja termit

5115A	Symmetricom 5115A Phase Noise Test Set, laboratorion uusi vaihevertaaja.
8040C	Symmetricom 8040C, laboratorion uusi käyttönormaali.
ADEV	Allan deviation, Allan-deviaatio.
AVAR	Allan variance, Allan-varianssi.
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures, Kansainvälinen paino- ja mittatoimisto.
DUT	Device under test, testattava laite.
FINAS	Suomen kansallinen akkreditointielin.
GPS	Global Positioning System, satelliittipaikannusjärjestelmä.
GPSDO	GPS disciplined oscillator, GPS-lukittu oskillaattori.
K013	Ilmavoimien Materiaalilaitoksen Varikon Kalibroitilaboratorion akkreditointitunnus.
NEQBW	Noise equivalent bandwidth, kohinakaistanleveys.
NIST	National Institute of Standards and Technology, Yhdysvaltain kansallinen standardointi- ja teknologainstituutti.
PLL	Phase-locked loop, vaihelukittu silmukka. Sääntömekanismi, jossa järjestelmän ulostulon vaihe on sama kuin sisäänmenon vaihe.
PPS	Pulse per second, pulssia sekunnissa. Yleinen taajuusnormaalien signaali, joka on lyhyt sekunnin välein toistuva pulssi.
R&S XSRM	Rohde & Schwarzin valmistama rubidiumoskillaattorin malli, joka on toiminut laboratorion vanhan järjestelmän käyttönormaalina.
SSB	Single sideband, yksisivukaistainen. Vaihekohinan spektrin esitysmuoto.
TCH	Three-cornered hat, kolmiohattumenetelmä.
TRAIM	Time Receiver Autonomous Integrity Monitoring. XLi:n ominaisuus, joka valvoo GPS-satelliittien signaalin laatua.
USNO	United States Naval Observatory, Yhdysvaltain laivaston observatorio.
UTC	Coordinated Universal Time, koordinoitu yleisaika. Ajan, taajuuden ja aikavälin kansainvälinen primäärinormaali.
VCXO	Voltage-controlled crystal oscillator, jänniteohjattu kideoskillaattori.
XLi	Symmetricom XLi Time and Frequency System, laboratorion uusi referenssinormaali.

Matemaattiset merkinnät

Γ	Kohinatyyppien vapausasteiden suhdeluku
Δ	Merkitsee suureen kahden arvon erotusta
δf	Taajuuden stabiilisuus
δt	Vaiheen siirtymän aiheuttama ajan muutos
κ_α	Kohinatyyppin kerroin
\mathcal{L}	Vaihekohina
σ	Keskihajonta
σ_y	Allan-deviaatio
σ_y^2	Allan-varianssi
τ	Keskiarvoistusaika
τ_0	Lomitetun Allan-varianssin keskiarvoistusaika
ϕ	Vaihe
ψ	Vaihe-ero testilaitteen jakson yksikkönä
A	Amplitudi
A_0	Nimellisamplitudi
c	Herkkyyskerroin
E	Energia, energiataso
F	Ylihienorakennekvanttiluku
f	Taajuus
f_0	Nimellistaajuus
f_{off}	Suhteellinen taajuuspoikkeama
h	Planckin vakio
I_α	Kohinatyyppin aiheuttama epävarmuus
i	Näytteen järjestysluku
J	Kokonaisliikemääräkvanttiluku
k	Kattavuuskerroin
M	Keskiarvoistetun suhteellisen taajuuden näytteiden määrä
N	Aikavirhemittausten määrä
n	Pääkvanttiluku, näytemäärä, τ_0 :n kerroin
P_c	Kantoaallon tehotiheys
S_ϕ	Vaihespektri
s	Näytekeskihajonta
s^2	Näytevarianssi
s_b	Lineaarisen sovituksen keskihajonta
T	Jaksonaika, mittausten välinen aika
t	Aika
\bar{t}	Mittausajan keskiarvo
U	Mittauksen laajennettu epävarmuus
u	Mittauksen standardiepävarmuus
y	Esimerkkisignaalin näytteen arvo
\bar{y}	Näytekeskiarvo, keskiarvoistettu suhteellinen taajuus
x	Aikavirhe, estimaatti
\hat{x}	Lineaarisen sovituksen arvo

1 Johdanto

Ilmavoimien Materiaalilaitoksen Varikko vastaa muun muassa sotilasilmailuun liittyvän materiaalin mittaus-, huolto- ja testauspalveluista. Varikolla toimii Suomen kansallisen akkreditointielimen FINASin akkreditoima kalibrointilaboratorio, jonka akkreditointitunnus on K013. Kalibrointilaboratorion tehtävänä on valvoa Ilmavoimien joukko-osastojen kalibrointitoiminnan laatua. Se vastaa viime kädessä myös Ilmavoimien mittaustoiminnan metrologisesta jäljitettävyydestä kansallisiin ja kansainvälisiin mittanormaaleihin. Laboratoriolla on siis tärkeä rooli Ilmavoimien suorituskyvyn ylläpitämisessä.

K013:n pätevyysalueeseen kuuluu kolme kalibrointialaa, jotka ovat aika ja taajuus, tasa- ja pientaajuiset sähkösuureet sekä mekaaniset suuret. Aika ja taajuus-kalibrointialan kaksi akkreditoitua suuretta ovat aikaväli ja taajuus. Aikaväli- ja taajuusmittauslaitteisto lähestyy, tai on jo ylittänyt sille määritellyn käyttöiän ja sen päivittäminen on koettu tarpeelliseksi. Laboratorion henkilökunnan tekemän tarkemman arvion mukaan järjestelmän käyttö- ja referenssinormaaleina toimivat atomikellot sekä piirturi ja vaihevertaaja on uusittava. Laitteiston päivittämisen pääasiallisena tarkoituksena on mahdollistaa akkreditoinnin jatkuvuus, eikä laboratoriolle ole tarvetta parantaa sille jo myönnettyä aikaväli- ja taajuussuureiden mittauskykyä.

Ikääntymisen lisäksi uusittavien laitteiden ongelmana on ollut käyttönormaalien kalibroinnin pitkä kesto, joka on täytynyt tehdä aina ennen akkreditoidun mittauksen suorittamista. Ongelmana on myös ollut piirturin ja vaihevertaajan aiheuttama suuri epävarmuus mittaustuloksiin.

Vanhassa järjestelmässä aikaväliä ja taajuutta on mitattu kahdella eri taajuuslaskimella, joiden ulkoisena referenssinä laboratorion käyttönormaali on toiminut. Taajuuslaskimia ei ole tarpeen uusia. Pistetaajuuksien mittaamiseen ja käyttönormaalien kalibrointiin on käytetty piirturia ja vaihevertaajaa.

Järjestelmän modernisointi tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa uusi järjestelmä suunnitellaan, rakennetaan ja sen suorituskkyä arvioidaan. Samanaikaisesti vanha järjestelmä pidetään toimintakykyisenä siten, että se toimii vielä laboratorion aikaväli- ja taajuussuureiden mittausteistona. Toisessa vaiheessa FINAS suorittaa uuden järjestelmän arvioinnin ja järjestelmä otetaan käyttöön. Tämä diplomityö keskittyy modernisoinnin ensimmäiseen vaiheeseen ja antaa valmiudet FINASin arviointiprosessin käynnistämiseen laboratoriolle sopivana ajankohtana.

Diplomityön ensisijaisena tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa uusi aikaväli- ja taajuusmittausjärjestelmä, jonka suorituskky on vähintään yhtä hyvä kuin nyt käytössä olevan järjestelmän mittauskyky. Lisäksi tavoitteena on luoda järjestelmä,

jossa käyttönormaalien käyttö akkreditoituissa mittauksissa on sujuvampaa. Toissijaisena tavoitteena työssä on syventää ymmärrystä laitteiston toiminnasta ja edesauttaa laboratoriota tulevassa FINASin arviointiprosessia.

Työssä esitellään ensin atomikellojen toiminnan ymmärtämisen kannalta tärkeät kvanttimekaaniset ilmiöt sekä yleisesti käytössä olevan rubidiumkaasukennonormaalien ja GPS-lukitun oskillaattorin rakenne. Tämän jälkeen perehdytään oskillaattorin ominaisuuksiin ja niiden karakterisoinnissa käytettäviin menetelmiin. Lopuksi esitellään vanhan järjestelmän toiminta, uuden laitteiston suunnittelu sekä arvioidaan uuden laitteiston suorituskykyä.

2 Atomikellon toimintaperiaate

Taajuusnormaaleina toimivat atomikellot perustuvat yleensä vedyn, cesium-133:n tai rubidium-87:n perustilan ylihienoon siirtymään (engl. ground state hyperfine transition). Atomikellon toimintamekanismi ei riipu pelkästään kellossa käytettävästä alkuaineesta, sillä saman alkuaineen perustilan ylihieno siirtymä voidaan hyödyntää monella eri tavalla.

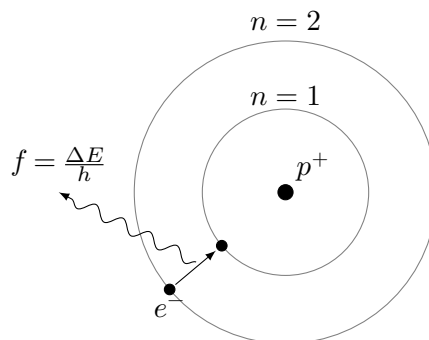
Kaikki K013-laboratorion taajuusnormaaleina toimivat atomikellot ovat rubidium-87-isotooppia hyödyntäviä kaasukennonormaaleja (engl. gas cell standard). Tässä luvussa esitellään kaasukennonormaalien toiminnan ymmärtämisen kannalta kolme keskeistä käsitettä: perustilan ylihieno siirtymä, magneettinen resonanssi ja optinen pumppaus.

2.1 Perustilan ylihieno siirtymä

Atomin absorboima tai emittoima sähkömagneettinen säteily on kvantittunut, eli säteilyn energia voi saada vain tiettyjä ennalta määrättyjä arvoja. Säteilyenergian E suhde säteilyn taajuuteen f noudattaa yhtälöä

$$E = hf \quad (1)$$

jossa h on Planckin vakio. [1, s. 1156] Yhtälö on havainnollistettu kuvassa 1 Bohrin atomimallilla.

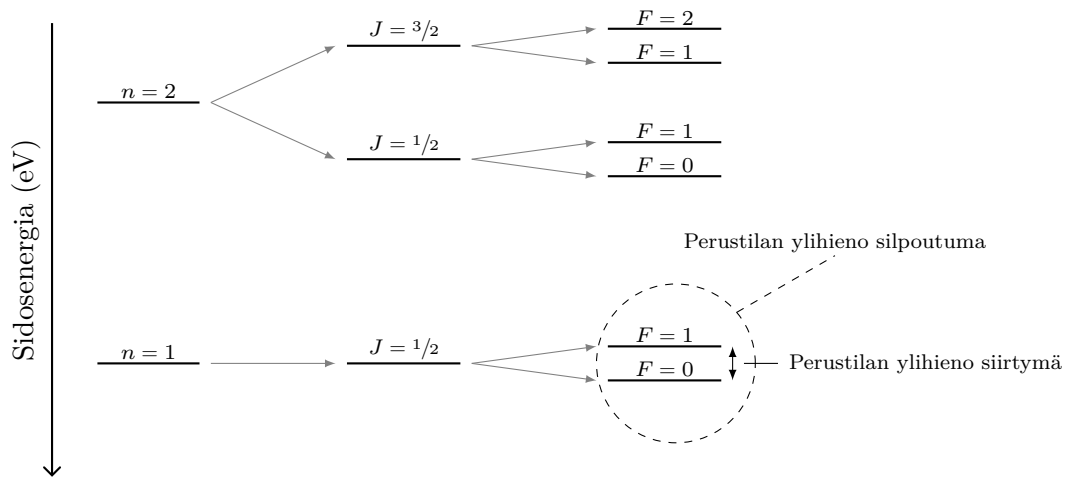


Kuva 1: Bohrin atomimalli vedystä. Kuvaan on piirretty vain kaksi ensimmäistä kiertorataa. Elektroni voi kiertää ydintä myös paljon kauempana.

Vedyssä ytimen protonia p^+ kiertää yksi elektroni e^- . Bohrin atomimallin mukaan elektroni voi kiertää ydintä vain tietyillä kiertoradoilla n , jotka kuvaavat atomin energiatiloja. Kuvassa 1 elektroni hyppää matalammalle energiatilalle ja tasojen välinen energiaero ΔE poistuu valokvanttina eli f taajuisena säteilynä. Vastaavasti vety, jonka elektroni on kiertoradalla $n = 1$, virittyy, kun se absorboi f taajuisen valokvantin ja elektroni hyppää korkeammalle energiatilalle $n = 2$. Virittynyt atomi

pyrkii aina purkautumaan alimpaan mahdolliseen energiatilaan n , jota kutsutaan perustilaksi. Perustilaa korkeampia n tiloja kutsutaan viritustiloiksi. [1, s. 1246]

Bohrin atomimalli on kuitenkin vanhentunut, eivätkä atomimallin kiertoradat kuvaa tarkasti atomin kaikkia mahdollisia energiatiloja [1, s. 1320]. Nykyään tiedetään, että eri energiatilojen muodostuminen riippuu kolmesta tekijästä: elektronien, orbitaalien ja atomin ytimen keskinäisestä kvanttimekaanisesta interaktiosta. Kvanttimekaanisten ominaisuuksien eri kombinaatiot muodostavat niin kutsutun atomin hieno- ja ylihienorakenteen, jotka aiheuttavat energiatilojen n jakautumisen pienempiin osiin eli energiatilojen silpoutuman (engl. fine and hyperfine splitting). [1, s. 1335] Vetyatomin energiatilojen silpoutuma on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2: Vetyatomin energiatilojen hieno ja ylihieno silpoutuma. Bohrin atomimallin kiertoradat eli energiatilat n jakautuvat todellisuudessa pienempiin osiin elektronin, orbitaalien ja ytimen keskinäisestä vaikutuksesta. [2, s. 562]

Kuvassa 2 elektronin ja orbitaalien keskinäinen interaktio muodostaa energiatilat J . Tilat jakautuvat vielä pienempiin osiin F ytimen kvanttimekaanisesta vaikutuksesta. Tiloja J kutsutaan atomin hienorakenteeksi ja tiloja F ylihienorakenteeksi. Luvut n ovat pääkvanttilukuja (engl. principal quantum number), luvut J ovat kokonaisliikemääräkvanttilukuja (engl. total angular momentum quantum number) ja luvut F ylihienorakennekvanttilukuja (engl. hyperfine structure quantum number). [3] Lukujen seikkaperäinen selittäminen ei ole tämän työn ymmärtämisen kannalta tarpeellista.

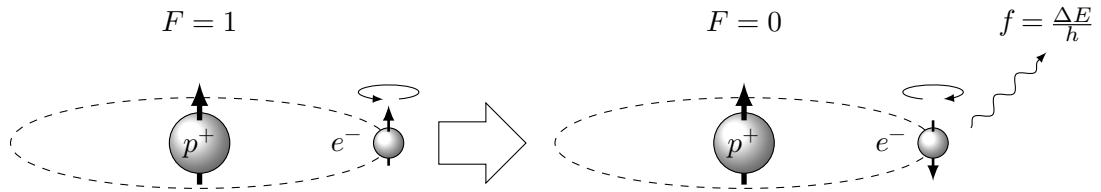
Kuvasta 2 nähdään, että virittyneen $n = 2$ -energiatilalla olevan atomin siirtymien perustilalle $n = 1$ ei emittoi aina samantaaajuista valokvanttia, kuten Bohrin atomimallissa. Valokvantin taajuus ja siten vapautuva sidosenergia riippuu tarkemmin siitä, millä ylihienorakenteen F -tilalla koko atomin muodostama kvanttimekaaninen järjestelmä on ja mille ylihienorakenteen tasolle se putoaa.

Kuvasta 2 nähdään myös, että vedyn perustila $n = 1$ ei ole jakautunut useam-

paan J -tasoon. Tämä tarkoittaa, että vedyn elektronin orbitaali – eli sen kiertorata – ei vaikuta perustilan silpoutumaan [4, s. 102]. Perustilan silpoutuma aiheutuu ainoastaan atomin ytimestä ja elektronin spinistä.

Spini on kvanttimekaaninen ominaisuus, jolla ei ole suoraa vastinetta klassisessa mekaniikassa. Spini pystytään kuitenkin havainnollistamaan klassisen mekaniikan avulla kuvittelemalla elektroni hiukkaseksi, joka pyörii oman akselinsa ympäri. Pyörimisliikettä kuvaava suure on liikemäärämomentti, jonka vektori on kohtisuorassa pyörimistasoon nähden ja vektorin suunta riippuu pyörimissuunnasta. Spini on elektronin liikemäärämomentti, kun se pyörii oman akselinsa ympäri. [1, s. 1332]

Vety on korkeammassa $F = 1$ -tilassa, kun elektronin ja ytimen liikemäärämomentit eli spinit ovat samansuuntaisia. Kun spinit ovat vastakkaissuuntaisia, on vety matalammassa $F = 0$ -tilassa. Elektronin spinin kääntymisen aiheuttama siirtyminen tilojen välillä on perustilan ylihieno siirtymä, johon atomikellojen toiminta perustuu [4, s. 102]. Kuvan 2 perustilan ylihienon siirtymän aiheuttava spinin kääntyminen on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Elektronin spinin kääntymisen aiheuttama perustilan ylihieno siirtymä. Vetyatomi on ensin korkeammassa $F = 1$ -perustilassa, kun spinejä kuvaavat nuolet ovat samansuuntaisia. Elektronin spinin kääntyminen aiheuttaa atomin siirtymisen alemmalle $F = 0$ -energiatilalle, ja tilojen välinen energiaero ΔE poistuu f -taajuisena valokvanttina.

Cesium-133- ja rubidium-87-isotoopit ovat vetyä paljon monimutkaisempia alkuaineita, mutta niillä on vain yksi valenssielektroni ja niiden sisempien elektronikuorien liikemäärämomentti on nolla [5, s. 14; 6]. Tämä tarkoittaa, että sisemmät elektronit eivät vaikuta perustilan ylihienoon silpoutumaan. ^{87}Rb :n ja ^{133}Cs :n uloin elektroni käyttäytyy siis perustilassa samalla tavalla kuin vedyn yksittäinen elektroni, ja perustilan ylihieno siirtymä aiheutuu valenssielektronin spinin kääntymisestä suhteessa ytimen spiniin.

2.2 Magneettinen resonanssi

Vedyn siirtyminen perustilan tasolta toiselle eli spinin kääntyminen, on kvanttimekaanisesti kielletty siirtymä [7, s. 124]. Tämä ei tarkoita, että se on mahdotonta, vaan että sen spontaani tapahtuminen on hyvin epätodennäköistä. Esimerkiksi kuvan 3 vedyn siirtymä $F = 1 \rightarrow F = 0$ emittoi 1,42 GHz taajuisista säteilyä ja siirtymä tapahtuu yksittäiselle vetyatomille keskimäärin kerran 10 miljoonassa vuodessa [8,

s. 7]. Perustilan spontaani siirtymä on liian epätodennäköistä, eikä sen hyödyntäminen ole kaasukennonormaaleissa mahdollista [4, s. 152]. Siirtymän todennäköisyys kasvaa, jos atomi törmää muihin molekyyliin tai atomeihin tai atomia stimuloidaan sähkömagneettisella säteilyllä [9, s. 196].

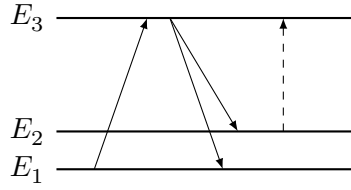
Magneettinen resonanssi syntyy, kun atomia stimuloidaan sähkömagneettisella säteilyllä, jonka taajuus on sama kuin energiatilojen siirtymän taajuus. Stimulointi saa elektronin spinin oskilloimaan samansuuntaisuuden ja vastakkaissuuntaisuuden välillä suhteessa atomin ytimeen. Elektroni on kvanttimekaanisessa superpositiossa, ja atomin voidaan ajatella olevan samanaikaisesti molemmissa F -tiloissa. Atomin energiatila varsinaisesti valikoituu, eli atomi relaksoituu, kun se törmää muihin atomeihin tai molekyyliin. Mitä enemmän stimuloivan sähkömagneettisen säteilyn taajuus poikkeaa ylihienon siirtymän taajuudesta, sitä epätodennäköisempää säteilyn aiheuttama siirtymä tilojen välillä on. [4, s. 122]

2.3 Optinen pumppaus

Magneettisessa resonanssissa tapahtuva perustilan siirtymä on vastavuoroista eikä sen hyödyntäminen oskillaattoreissa ole suoraan mahdollista. Huoneenlämmössä vedyn, cesium-133:n ja rubidium-87:n energiatila voi olla yhtä todennäköisesti kumpi tahansa ylihienorakenteen perustiloista [7, s. 246]. Lisäksi perustilan ylihienot energiatasot ovat kvanttimekaanisesti yhtä todennäköisiä. Toisin sanoen molemmilla F -perustiloilla on yhtä paljon atomeita, ja magneettisessa resonanssissa atomien tilat vaihtavat vain keskenään paikkaa. Tiloilla olevien atomien lukumäärä ei muutu, järjestelmän energia pysyy samana, eikä järjestelmässä ole ulkopuolisesti havaittavaa muutosta. Magneettisen resonanssin hyödyntäminen vaatii, että tiloilla on eri määrä atomeja, jolloin tasojen välillä voi tapahtua atomien nettosiirtymä. [4, s. 152]

Optinen pumppaus on menetelmä, jolla atomi voidaan siirtää energiatilalta toiselle. Pumppausmenetelmiä on useita, ja käytettävä menetelmä riippuu atomikellon tyypistä. Kaasukennonormaaleissa optinen pumppaus tapahtuu siten, että atomiin kohdistetaan valoa. Kun valon taajuus valitaan oikein, valo pystyy virittämään vain toisella F -perustilalla olevan atomin ylempään n -viritystilaan. Viritystila on epästabili ja atomi palaa nopeasti takaisin perustilaan. Purkautuessaan perustilaan atomin elektronin spini voi päätyä joko samansuuntaiseksi tai vastakkaissuuntaiseksi ytimen spiniin nähden. Perustilaan palannut atomi on siis sattumanvaraisesti jommalla kummalla perustilan ylihienorakenteen F -tilalla riippuen elektronin spinin suunnasta. Mikäli atomi päätyy takaisin tilalle, josta valo pystyy sen virittämään, pumppautuu atomi uudestaan ylemmälle viritystilalle. Tämä jatkuu niin kauan, kunnes atomi jää loukkuun sille ylihienorakenteen tilalle, josta valo ei sitä pysty virittämään. [4, s. 154] Optisen pumppauksen toiminta on esitetty yksinkertaistetulla

energiatasodiagrammilla kuvassa 4.



Kuva 4: Optisen pumppauksen toiminta havainnollistettuna kolmen energiatason avulla. Pumppauksessa käytettävä valo ei pysty aiheuttamaan katkoviivalla esitettyä siirtymää. [7, s. 144]

Kuvassa alkuaineen atomit ovat jakautuneet tasaisesti energiatiloille E_1 ja E_2 . Atomeihin kohdistettu valo voi aiheuttaa vain siirtymän $E_1 \rightarrow E_3$, mutta ei katkoviivalla esitettyä siirtymää $E_2 \rightarrow E_3$. E_1 -tilan atomit virittyvät valon vaikutuksesta ja purkautuvat sattumanvaraisesti takaisin tiloille E_1 tai E_2 . Kun pumppausta jatketaan, päätyvät lähes kaikki järjestelmän atomit energiatilaan E_2 . [7, s. 143]

3 Rubidiumnormaali

Cesium-133:n perustilan ylihienoa siirtymää käytetään kansainvälisen yksikköjärjestelmän eli SI-järjestelmän ajan perusyksikön, sekunnin, määrittelyyn. Nykyisen, vuonna 1967 tehdyn määritelmän mukaan sekunti on 9 192 631 770 kertaa cesium-133:n perustilan ylihienon siirtymän säteilyn jaksonaika 0 K lämpötilassa [10, s. 113]. Hertsi on sekunnin käänteisyksikkö, josta seuraa, että cesium-133:n perustilan ylihienon siirtymän taajuus on tarkalleen 9 192 631 770 hertsiä. Cesium-133:n siirtymään perustuvat atomikellot toimivat siis primäärisinä taajuusnormaaleina.

Cesiumprimäärinormaalit ovat kalliita ja siksi halvemmat rubidiumkaasukennonormaalit ovat yleisempiä. Lyhyellä aikavälillä rubidiumnormaalin suorituskyky on hyvä, mutta ilman jatkuvaa viritystä ja kalibrointia sen suorituskyky saattaa olla jopa tuhat kertaa primäärinormaalia huonompi. Ongelma voidaan kiertää lukitsemalla rubidiumnormaali GPS-satelliittipaikannusjärjestelmän lähettämään tarkkaan aika-signaaliin. [11]

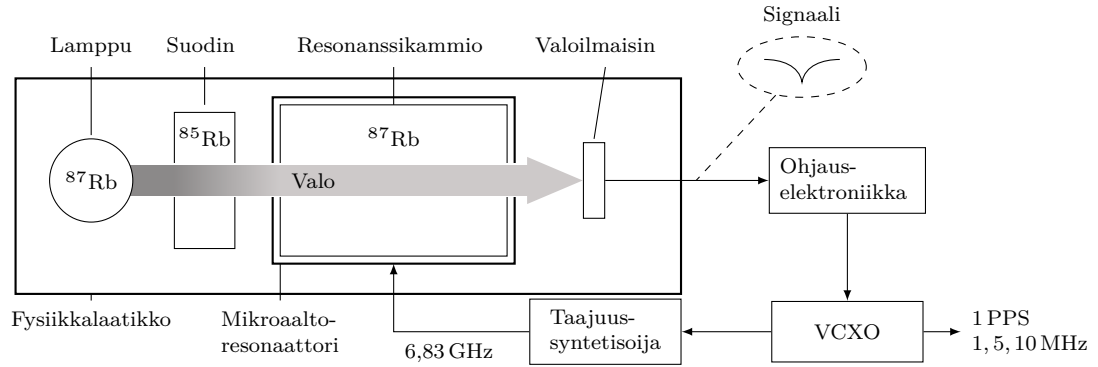
K013-laboratoriolla on sekä vapaasti värähteleviä, että GPS-lukittuja rubidiumnormaaleja. Tässä luvussa esitellään rubidiumkaasukennonormaalien ja GPS-lukitun oskillaattorin toimintaperiaate.

3.1 Rubidiumkaasukennonormaalien toimintaperiaate

Rubidiumkaasukennonormaalien toiminta perustuu rubidium-87:n perustilan ylihienon siirtymään, jonka taajuus on 6 834 682 610,904 29(9) Hz eli noin 6,83 GHz [12]. Kuten vedyssä, rubidium-87:n perustila on jakautunut kahtia, mutta ^{87}Rb :ssä perustilan tasojen ylihienorakennekvanttiluvut ovat $F = 1$ ja $F = 2$. Rubidiumnormaalien ytimenä on niin kutsuttu fysiikkalaatikko (engl. physics box), joka sisältää ^{87}Rb -lampun, ^{85}Rb -suotimen, mikroaaltoresonaattorin, resonanssikammion, jossa on ^{87}Rb -kaasua ja valoilmaisimen. Rubidiumnormaalien rakenne on esitetty kuvassa 5. [7, s. 246]

Resonanssikammiossa olevan ^{87}Rb -kaasun $F = 1$ -tilalla olevat atomit pumpataan optisesti ylemmälle $F = 2$ -tilalle käyttämällä hyödyksi ^{87}Rb -lampun ja ^{85}Rb -suotimen yhdistelmää. Rubidium-85:n spektri on sattumalta sellainen, että se absorboi itseensä taajuudet, jotka kykenisivät virittämään rubidium-87:n $F = 2$ -tilan atomit. Lampun emittoima valo absorboituu siis ^{85}Rb -suotimeen siten, että suotimen lävitse päässyt valo pystyy virittämään ainoastaan resonanssikammion ^{87}Rb -kaasun $F = 1$ -tilan atomit. Virittyneet atomit purkautuvat sattumanvaraisesti takaisin $F = 1$ - tai $F = 2$ -tilaan. Muutaman pumppaus syklin jälkeen lähes kaikki atomit ovat $F = 2$ -tilalla. Resonanssikammion kaasusta tulee tällöin läpinäkyvää suodattuneelle valolle, sillä ^{87}Rb -kaasu ei pysty enää absorboimaan suotimen läpi pääsnyttä valoa itseensä. Resonanssikammion lävitse päässeeseen valon määrä ha-

vaitaan valoilmaisimessa. [7, s. 247]



Kuva 5: Rubidiumkaasukennonnormaalin rakenne. Valoilmaisimessa havaittava valo toimii ohjaussignaalinä mikroaaltoresonaattorin taajuutta kontrolloivalle kideoskillaattorille. [7, s. 247]

Kun resonanssikammion kaasun atomeita stimuloidaan sähkömagneettisella säteilyllä, jonka taajuus on rubidium-87:n ylihienon siirtymän taajuus, ovat kaasun atomit magneettisessa resonanssissa. Koska lähes kaikki atomit ovat tilalla $F = 2$, on resonanssin aiheuttama siirtymän suunta pääasiassa tilalta $F = 2$ tilalle $F = 1$. Resonanssikammion $F = 1$ -tilalle palanneet atomit pystyvät absorboimaan taas valoa, joka aiheuttaa pienen notkahduksen valoilmaisimessa havaittavassa valon määrässä. [7, s. 248]

Valoilmaisimeen saapuva valo toimii ohjaussignaalinä jänniteohjatulle kideoskillaattorille (VCXO), joka syöttää kellosignaalia sähkömagneettista säteilyä generoivalle mikroaaltoresonaattorille. Sähkömagneettisen säteilyn taajuuden poikkeama magneettisesta resonanssitaajuudesta pienentää $F = 2 \rightarrow F = 1$ -siirtymän todennäköisyyttä, joka kasvattaa valoilmaisimessa havaittavaa valon määrää. Tällöin ohjaus-elektronikka säättää kideoskillaattoria siten, että valoilmaisimessa havaittava valo on taas mahdollisimman vähäistä. Toisin sanoen, VCXO lukittuu rubidium-87 isotoopin ylihienoon siirtymään valoilmaisimen signaalin notkahduksen perustella. VCXO toimii erittäin tarkkana taajuusreferenssinä ja sen avulla voidaan tuottaa esimerkiksi yleisesti käytössä olevia 10 MHz ja 1 PPS (engl. pulse per second) signaaleja. [7, s. 248]

Atomikello luokitellaan resonanssimekanismin mukaan joko passiiviseksi tai aktiiviseksi taajuusnormaaliksi. Aktiivisessa taajuusnormaalissa atomien ylihienon siirtymän emittoima säteily pitää resonanssia yllä itsenäisesti eikä resonanssikammioon tarvitse ulkoisesti tuottaa mikroaaltoresonaattorilla säteilyä. Passiivisessa taajuusnormaalissa kideoskillaattori lukitaan atomien siirtymään takaisinkytkennällä, jossa kideoskillaattori ajaa mikroaaltoresonaattoria, joka pitää atomit resonanssissa. Rubidiumkaasukennonnormaali on siis passiivinen taajuusnormaali. [7, s. 2–3]

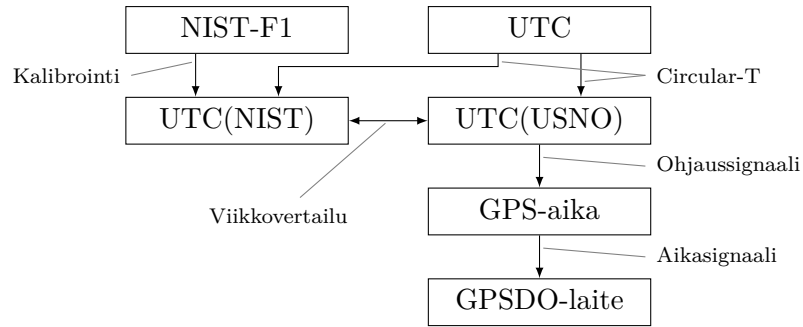
3.2 GPS-lukittu oskillaattori

Rubidiumnormaalin ajautumaan ja taajuuteen vaikuttaa pääasiassa resonanssikammion ominaisuuksien muuttuminen, kideoskillaattorin kiteen epäideaalisuudet ja Starkin ilmiö. Resonanssikammion ominaisuudet muuttuvat sen sisältämän kaasun diffuusoituessa kammion seinämiin, jolloin kammion paine ja kaasun koostumus muuttuvat [7, s. 249]. Kideoskillaattorin epäideaalisuudet vaikuttavat mikroaaltoresonaattorin käyttäytymiseen, kun VCXO:n kiteen muutaman megahertsin ominaistaajuus pitää kasvattaa taajuussyntetisaattorissa 6,83 GHz taajuuteen. Esimerkiksi 5 MHz kiteen taajuus kasvaa yli tuhatkertaiseksi, jolloin myös kiteen epäideaalisuuksien vaikutus moninkertaistuu. [4, s. 164] Pumpaavan valon sähkökenttä aiheuttaa Starkin ilmiön, joka muuttaa rubidiumkaasun elektronien jakaumaa ja jakauman muutos siirtää rubidiumin ylihienorakenteen energiatasoja. Energiatasojen muutos ei tapahdu samassa suhteessa, joten tasojen välinen energiaero ja siten ylihienon siirtymän taajuus muuttuvat hieman. [4, s. 160]

Resonanssitaajuuden muuttumisen ja ajautuman seurauksena rubidiumnormaali vaatii jatkuvaa kalibrointia, mikäli sitä halutaan käyttää kalibrointilaboratorion taajuusnormaalina [11]. Jatkuvan kalibroinnin ongelma ratkaistaan tyypillisesti lukitsemalla rubidiumnormaali GPS-satelliittien lähettämään tarkkaan aikasignaaliin, jolloin rubidiumnormaalista tulee automaattisesti kalibroituva GPS-lukittu oskillaattori (engl. GPS disciplined oscillator, GPSDO) [7, s. 250].

GPSDO-laitteen vastaanottama aikasignaali on jäljitettävissä koordinoituun yleisaikaan (engl. Coordinated Universal Time, UTC), joka on Kansainvälisen paino- ja mittatoimiston (ransk. Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) ylläpitämä taajuuden, aikavälin ja ajan primäärinormaali [11; 13]. Jäljitettävyysskaavio on esitetty kuvassa 6. GPSDO-laite saa aikasignaalin GPS-järjestelmän satelliiteilta. Jokaisessa satelliitissa on neljä atomikelloa ja kellojen pitämää aikaa kutsutaan GPS-ajaksi [7, s. 404]. Satelliittien kelloja ohjataan maasta käsin Yhdysvaltain laivaston observatorion (engl. United States Naval Observatory, USNO) ylläpitämän koordinoitun yleisajan perusteella. UTC(USNO) ohjataan vuorostaan vastaamaan UTC:tä BIPM:n julkaiseman Circular-T-nimisen kuukausitiedotteen perusteella, joka määrittää kaikkien UTC-toteutuksien, kuten UTC(USNO):n poikkeaman virallisesta UTC-ajasta. [7, s. 390]

Circular-T on laskennallinen *a posteriori* poikkeama, joka ilmoittaa UTC-toteutuksien edellisen kuukauden poikkeaman BIPM:n UTC:stä [7, s. 390]. Toisin sanoen, Circular-T:n avulla ei voi päätellä kuinka tarkka UTC(USNO) on juuri sillä hetkellä, vaan ainoastaan sen kuinka tarkka se oli edellisenä kuukautena. UTC(USNO) on GPS-järjestelmän toiminnan kannalta elintärkeä ja siksi UTC(USNO):n käyttäytymistä seurataan viikottain vertaamalla sitä Yhdysvaltain kauppaministeriön



Kuva 6: GPSDO-laitteen jäljitettävyysskaavio.

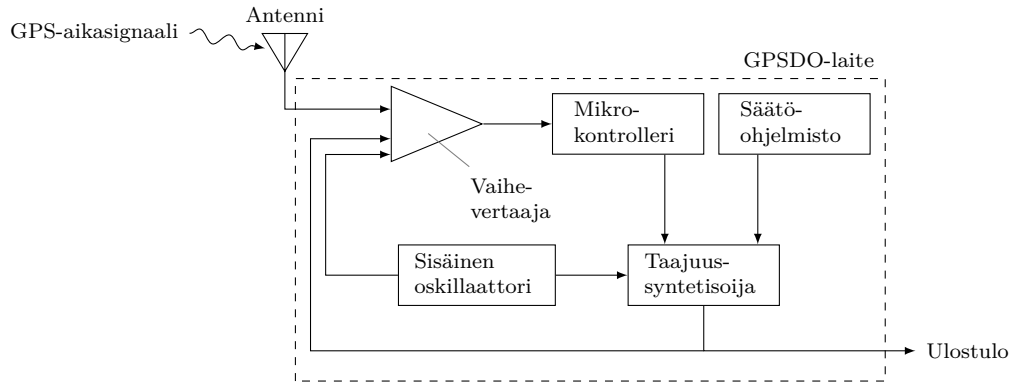
alaisen National Institute of Standards and Technology -viraston (NIST) ylläpitämään UTC(NIST) aikanormaaliin. UTC(NIST) on cesiumkelloista muodostetun kelloryhmän keskiarvo. Circular-T-ohjauksen ohella ryhmän kellot kalibroidaan tasan väliajoin NIST-F1-primäärinormaalia vasten, joka on cesium-133:n siirtymään perustuva cesiumlähdekello ja eräs maailman tarkimmista kelloista. [14; 15]

UTC(USNO) ja UTC(NIST) ovat Yhdysvaltojen virallisia aikanormaaleja ja viikkoverailun tarkoituksena on varmistaa, että aikanormaalit ovat yhdenmukaisia [14]. Virastojen keskinäisen sopimuksen mukaan UTC(NIST)–UTC(USNO) poikkeama ei saa ylittää 100 nanosekuntia [16]. Tyypillisesti poikkeama on kuitenkin alle 20 nanosekuntia [17].

GPSDO-laitteen etuna on kalibrointivapaan toiminnan lisäksi verrattain halpa hinta. Se yhdistää myös GPSDO:n oman oskillaattorin lyhyen aikavälin ja GPS-aikasignaalin pitkän aikavälin hyvät suorituskävyt keskenään [11]. GPS-aikasignaali on huono taajuusreferenssi lyhyillä aikaväleillä. Tämä johtuu muun muassa ilmakehän, etenkin ionosfäärin vaikutuksesta aikasignaaliin sekä satelliittien epäsymmetrisen kiertoradan aiheuttamasta gravitaatiopotentiaalin muuttumisesta, joka muuttaa satelliitin kellojen taajuutta suhteessa maan pinnalla olevaan tarkkailijaan tai vastaanottimeen. [7, s. 407,409] GPSDO-laitteiden väliset erot ovatkin suurimmillaan lyhyillä aikaväleillä, kun laitteen suorituskyky riippuu lähes yksinomaan sen sisäisestä oskillaattorista. Pitkillä aikaväleillä GPSDO-laite ohjaa sisäistä oskillaattoria aikasignaalin mukaan ja laitteiden väliset erot tasoittuvat tai häviävät melkein kokonaan.

Laitetasolla GPSDO:n lukitus aikasignaaliin voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Yleensä lukitusmenetelmä on patentoitu tai se on liikesalaisuus, joten harva valmistaja paljastaa kuinka lukitus on tarkalleen toteutettu. Periaatteessa lukitus tapahtuu vaihelukitun silmukan avulla (engl. phase locked loop, PLL), jossa GPSDO:n oma oskillaattori lukitaan GPS-aikasignaaliin takaisinkytkennän ja vaihevertaajan avulla. Vaihevertaajan ulostulo on aikasignaalin ja oskillaattorin vaiheiden erotus, ja mikrokontrolleri ohjaa oskillaattoria, kunnes signaalit ovat samassa vai-

heessa eikä vaihe-ero enää muutu. Toinen tapa lukituksen toteuttamiseen on laite, jossa sisäistä oskillaattoria ei ohjata suoraan. Järjestelyn etuna on, että oskillaattorin ajautuma ja käyttäytyminen ovat paremmin ennakoitavissa. [17] Tällainen laite on havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 7: GPSDO:n toteutus, jossa mikrokontrolleri ja säätöohjelmisto ohjaavat taajuussyntetisaattoria eivätkä oskillaattoria. [17]

Kuvassa 7 sisäisen oskillaattorin ja vastaanotetun GPS-aikasignaalin vaihe-ero havaitaan vaihevertaajassa, ja mikrokontrolleri ohjaa taajuussyntetisaattoria, joka tuottaa GPSDO:n ulostulon. Säätöohjelmiston tehtävänä on kompensoida sisäisen oskillaattorin ajautuman ja lämpötilan aiheuttamia muutoksia. Koska GPSDO:n tarkoituksena on yhdistää GPS-aikasignaalin ja sen oman oskillaattorin hyvät puolet, riippuu taajuussyntetisaattorin ohjauksen painotus siitä, kuinka hyvä GPSDO:n oma oskillaattori on. Esimerkiksi jos kuvan 7 sisäinen oskillaattori on kappaleessa 3.1 esitelty rubidiumkaasukennonormaali, muutetaan taajuussyntetisaattorin ohjausta harvoin. Vastaavasti, jos sisäinen oskillaattori on tavallinen kideoskillaattori, huomioidaan GPS-aikasignaali voimakkaammin ja ohjausta muutetaan useammin. [17]

4 Oskillaattorin karakterisointi

Ideaalisen oskillaattorin ulostulo $A(t)$ voidaan kuvata yhtälöllä

$$A(t) = A \sin(2\pi f t + \phi). \quad (2)$$

Oskillaattoreissa on kuitenkin epäideaalisuuksia, joiden seurauksesta amplitudi A ja taajuus f muuttuvat epäsäännöllisesti. Todellisen oskillaattorin ulostuloa kuvaa paremmin yhtälö

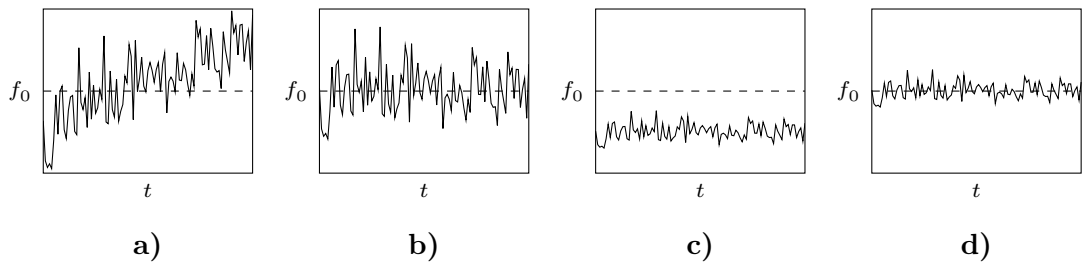
$$A(t) = (A_0 + \Delta A_0(t)) \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) \quad (3)$$

jossa amplitudissa A_0 esiintyy vaihtelua $\Delta A_0(t)$ ja oskillaattorin ulostulossa on vaiheen vaihtelua $\phi(t)$ (engl. phase fluctuations), joka aiheuttaa taajuuden epätoivottua vaihtelua (engl. frequency fluctuations tai jitter). [18, s. 2] Tämä tarkoittaa, että oskillaattorin taajuus ei ole tarkalleen sen ideaalinen nimellistaajuus f_0 , eikä oskillaattorin taajuus ole täysin stabiili.

Oskillaattorin ominaisuuksien tutkimuksen tavoite on tuottaa tilastollisten menetelmien avulla ytimekäs, mutta kattava kuvaus oskillaattorin taajuuden tarkkuudesta ja stabiilisuudesta [19, s. 2]. Oskillaattorin tarkkuus kertoo kuinka lähellä oskillaattorin taajuus f on ideaalista nimellistaajuutta f_0 , ja oskillaattorin stabiilisuus kertoo kuinka hyvin oskillaattori pysyy taajuudessa f . Oskillaattorin tutkimuksessa kiinnostavin on siis yhtälön (3) termi $\phi(t)$, joka vaikuttaa taajuuteen. Oskillaattorin taajuus ajanhetkellä t eli sen hetkellistaajuus (engl. instantaneous frequency) on

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

eli vaiheen vaihtelun aikaderivaatan ja nimellistaajuuden summa. [19, s. 5] Tarkkuus ja stabiilisuus on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8: Taajuuden tarkkuuden ja stabiilisuuden havainnollistus. Taajuus f_0 on ideaalinen nimellistaajuus ja käyrä on tutkittavan oskillaattorin hetkellistaajuus $f(t)$. Tutkittava oskillaattori on a) epästabiili ja epätarkka; b) tarkka, mutta epästabiili; c) stabiili, mutta epätarkka; d) tarkka ja stabiili. [7, s. 4]

Kuvan 8b) oskillaattorin taajuus on lähellä nimellistaajuutta, mutta taajuus on epästabiili eli se vaihtelee voimakkaasti. Vastaavasti kuvan 8c) oskillaattorin oma

taajuus on melko stabiili, mutta sen taajuus poikkeaa selvästi nimellistaajuudesta. Taajuusnormaaliksi soveltuu parhaiten oskillaattori d), joka on tarkka ja stabiili. [7, s. 4] Seuraavissa kappaleissa esitellään seikkaperäisesti tarkkuuden ja stabiilisuuden käsitteet.

4.1 Tarkkuus

Oskillaattorin tarkkuus on oskillaattorin poikkeama ideaalisesta nimellistaajuudesta. Siitä käytetään termiä taajuuspoikkeama (engl. frequency offset). Tarkkuus ilmoitetaan usein suhteellisenä taajuuspoikkeamana (engl. fractional frequency offset). Suhteellinen taajuuspoikkeama f_{off} lasketaan taajuustasossa yhtälöllä

$$f_{\text{off}} = \frac{f - f_0}{f_0}. \quad (5)$$

Taajuusnormaaleja käsittelevässä kirjallisuudessa suhteellisen taajuuspoikkeaman arvo esitetään kymmenpotenssimuodon lisäksi joskus miljoonasosan suhdeyksikkönä ppm (engl. parts per million, 10^{-6}) tai miljardisosan suhdeyksikkönä ppb (engl. parts per billion, 10^{-9}). Suhteellinen taajuuspoikkeama muutetaan taajuuspoikkeamaksi kertomalla se nimellistaajuudella.

Yksinkertaisimmillaan oskillaattorin taajuuspoikkeama voidaan mitata taajuuslaskimella, jolloin f on taajuuslaskimen näyttämä ja f_0 on oskillaattorin spesifikaation mukainen nimellistaajuus. Aikatasossa suhteellinen taajuuspoikkeama lasketaan yhtälöllä

$$f_{\text{off}} = -\frac{\delta t}{T} \quad (6)$$

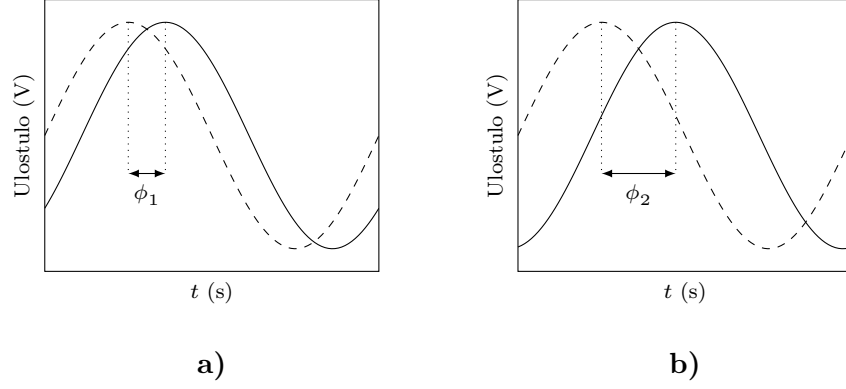
jossa δt on oskillaattorin vaiheen siirtymän aiheuttama ajan muutos suhteessa referenssiin ja T on siirtymään kulunut aika. Yksinkertainen mittaaminen voidaan tehdä oskilloskoopilla tai aikavälianalyysaattorilla.

Positiivinen taajuuspoikkeama tarkoittaa, että oskillaattorin vaihe siirtyy referenssin, esimerkiksi taajuuslaskimen kiteen, vaiheen edelle ja oskillaattorin taajuus on referenssiä suurempi. Negatiivinen taajuuspoikkeama tarkoittaa, että oskillaattorin vaihe jää jälkeen ja sen taajuus on referenssiä pienempi. Kuvassa 9 on esitetty tilanne, jossa oskillaattorin ulostulosignaalin vaihe jätättää. Vaiheen siirtymän aiheuttama ajan muutos on

$$\delta t = \frac{1}{2\pi f_0}(\phi_2 - \phi_1) \quad (7)$$

ja siirtymään kulunut aika on

$$T = t_2 - t_1. \quad (8)$$



Kuva 9: Oskillaattorin ja referenssin ulostulosignaalit aikatasossa. Referenssisignaali on piirretty katkoviivalla ja tutkittavan oskillaattorin signaali on piirretty yhtenäisellä viivalla. Kuvassa a) ajanhetkellä t_1 referenssin ja oskillaattorin välillä on vaihepoikkeama ϕ_1 . Kuvassa b) ajanhetkellä t_2 vaihepoikkeama on ϕ_2 eli oskillaattori on jäänyt jälkeen ja saavuttaa huippunsa myöhemmin kuin kuvassa a).

Usein riittää, kun laitteesta tiedetään mittaolosuhteiden ja viimeisimmästä kalibroinnista kuluneen ajan aiheuttama virhe mittaustulokseen. Yhtälöstä (4) ja kuvasta 8 kuitenkin nähdään, että oskillaattorin taajuus ja taajuuspoikkeama muuttuvat ajan funktiona. Tämän seurauksena kuvan 9 siirtymä ei ole vakionopeuksinen, eikä yhtälön (5) tai (6) perusteella laskettu taajuuspoikkeama anna kokonaiskuvaa oskillaattorin taajuuden käyttäytymisestä. Esimerkiksi taajuuslaskimen näyttämä on käytännössä oskillaattorin vaihtelevan taajuuden keskiarvo jollakin aikavälillä, joka riippuu laskimen ikkunointiajan (engl. gate time) asetuksesta. Oskillaattorien perusteellista karakterisointia varten tarvitaan stabiilisuuden mitta, joka kuvaa sen taajuuden vaihtelua.

4.2 Stabiilisuus

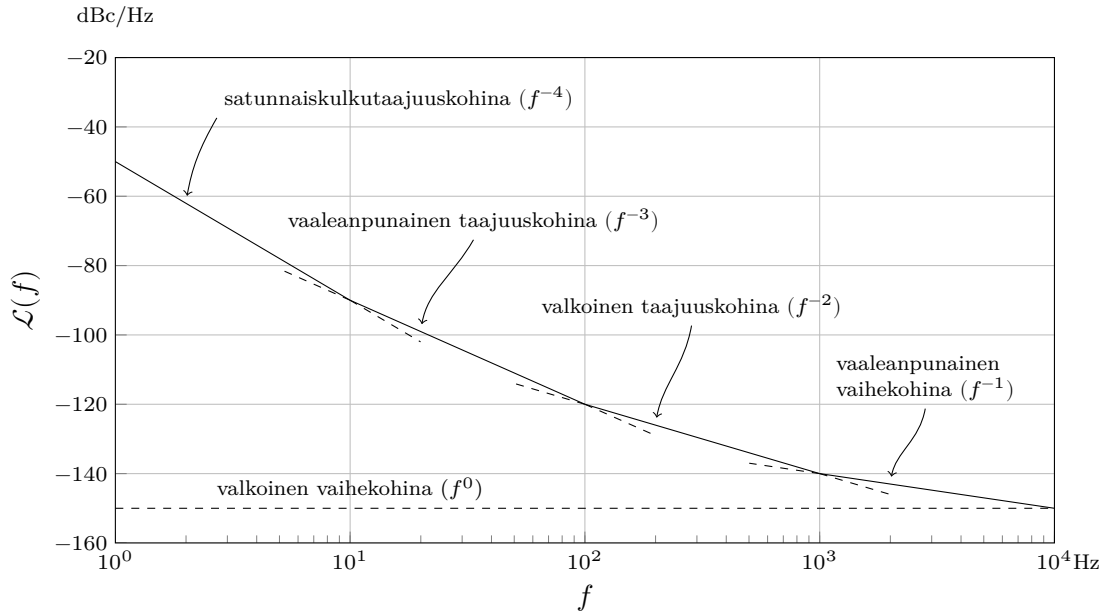
Taajuusnormaaleissa stabiilisuus on tarkkuutta tärkeämpi ominaisuus, sillä stabiilisuus asettaa rajan oskillaattorin suorituskvyyille: oskillaattorin taajuuden epävarmuus ei voi olla pienempi kuin sen stabiilisuus [11]. Epästabiilisuus eli taajuuden vaihtelu aiheutuu kohinasta, jota kuvataan viidellä eri kohinatyyppillä [18, s. 14]. Yleensä laitteessa esiintyvä kohina ei jakaudu tasaisesti, vaan taajuuden vaihtelu aiheutuu pääasiassa muutamasta dominoivasta kohinatyyppistä. Kaikkien oskillaattorien kohina voidaan luokitella samalla tavalla, mutta kohinoiden esiintyminen ja aiheuttajat riippuvat tarkemmin oskillaattorin rakenteesta. Kohinatyyppit ja niiden aiheuttajat rubidiumkaasukennonormaaleissa on esitetty taulukossa 1.

Kohinatyyppit noudattavat potenssilakia (engl. power-law) ja kohinatyyppien synnyttämä koko oskillaattorin vaihekohina ilmaistaan yksisivukaistaisella vaihekohina-kuvaajalla (engl. single sideband phase noise plot, SSB phase noise plot). Vaihekohina $\mathcal{L}(f)$ ja kohinatyyppien taajuusriippuvuus on esitetty kuvassa 10.

Taulukko 1: Rubidiumkaasukennonormaleissa esiintyvät kohinatyyppit ja kohinan todennäköisimmät aiheuttajat. [7; 20; 21]

Kohinatyyppi	Aiheuttaja
Valkoinen vaihekohina	Elektroniikan epäideaaliset komponentit, etenkin vahvistimet.
Vaaleanpunainen vaihekohina	Epäideaaliset komponentit, vahvistimet ja taajuus-syntetisaattorit.
Valkoinen taajuuskohina	Rakenteellinen, johtuu VCXO:n lukitsemisesta ylihienon siirtymän resonanssiin.
Vaaleanpunainen taajuuskohina	Virtalähde, oskillaattorin fyysinen resonanssimekanismi ja sen osat.
Satunnaiskulkutaajuuskohina	Ympäristötekijät kuten värinä, lämpötilan muutokset ja laitteen siirtäminen.

Kuvasta 10 nähdään, että esimerkiksi satunnaiskulkutaajuuskohina dominoi pienillä taajuuksilla, ja valkoisen vaihekohinan tehospektri on vakio riippumatta taajuudesta. [19, s. 69]



Kuva 10: Yksisivukaistainen vaihekohinakuvaaja. Vaihekohina $\mathcal{L}(f)$ kuvaa oskillaattorin signaalin kohinatehoa suhteessa kantaaltaan. Kohinatyyppien taajuusriippuvuus on suluissa kohinatyyppin nimen perässä. [21, s. 13]

Tavallisesti $\mathcal{L}(f)$ ilmoitetaan desibeleinä ja sen yksikkö on desibeliä suhteessa kantaaltaan 1 Hz kaistanleveydellä.¹ Tällöin yksikkö lyhennetään yleisesti dBc/Hz, vaikka se ei ole virallisesti hyväksytty käytäntö. Tarkemmin määriteltynä vaihekohina on

¹”... its units are dB below the carrier in a 1 Hz bandwidth.” [18, s. 7]

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2}S_\phi(f) \quad (9)$$

jossa $S_\phi(f)$ on vaiheen vaihtelun yksipuoleinen tehospektri (engl. one-sided power spectral density) ja sen yksikkö on rad^2/Hz . [18, s. 7; 22, s. 7]

Oskillaattorin stabiilisuusanalyysiä käsittelevässä kirjallisuudessa taulukon 1 kohinatyypeistä kolmea kutsutaan taajuuskohinaksi ja kahta kutsutaan vaihekohinaksi, mutta myös $\mathcal{L}(f)$:ää kutsutaan vaihekohinaksi. Lisäksi yhtälön (3) termiä $\phi(t)$ kutsutaan joskus vaihekohinaksi. Vaihekohina-käsite ei ole siis yksiselitteinen, ja lukijan tulee huomioida, mitä käsitteellä kussakin yhteydessä tarkoitetaan. Tyhjentävästi sanottuna oskillaattorin taajuus $f(t)$ vaihtelee eli on epästabiili, koska laitteessa ilmenee vaihekohinaa $\mathcal{L}(f)$, joka aiheutuu sekä taajuus- että vaihekohinaksi kutsutuista kohinatyypeistä. Voidaan ajatella, että $f(t)$:n vaihtelun voimakkuus kuvaa oskillaattorin stabiilisuutta.

Tyypillisesti signaalianalyysissä vaihtelun voimakkuutta arvioidaan laskemalla mitattujen arvojen varianssi ja keskihajonta [23, s. 55]. Näytevarianssin s^2 yhtälö on

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

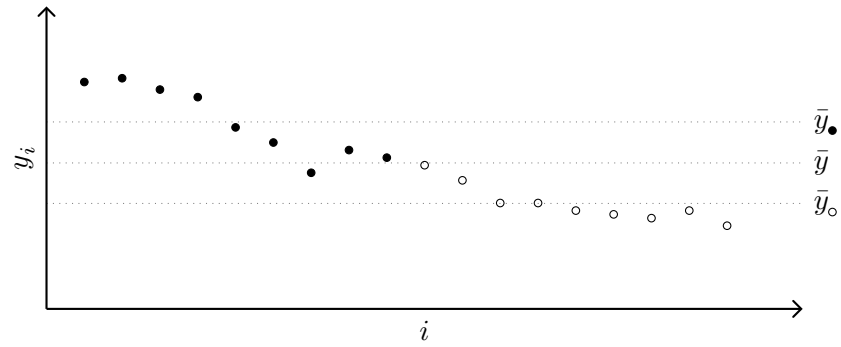
ja keskihajonta s on varianssin neliöjuuri

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (11)$$

Varianssin laskeminen perustuu yksittäisten näytteiden y_i poikkeamaan satunnaismuuttujan keskiarvon estimaatista eli näytekyskiarvosta \bar{y} . Varianssi ja keskihajonta sopivat prosessin tilastolliseen analyysiin vain, jos prosessi on stationäärinen ja ergodinen. Vaatimus tarkoittaa, että näytekyskiarvo \bar{y} ja varianssi s^2 pysyvät ajan suhteen vakioina. Käytännössä stationäärisyyttä ja ergodisuutta ei voi erottaa toisistaan ja yleensä todetaan, että prosessi on joko stationäärinen tai epästationäärinen. [23, s. 45] Epästationäärinen prosessi on havainnollistettu kuvassa 11.

Kuvan 11 sarjasta nähdään, että keskiarvo riippuu siitä, mitä aikaväliä keskiarvon laskemiseen käytetään. Tästä johtuen varianssin yhtälö (10) ei ole yksikäsitteinen, koska keskiarvo ei ole yksikäsitteinen. Lisäksi esimerkiksi sarjan neljän ensimmäisen näytteen arvot ovat lähellä toisiaan, mutta myös neljän viimeisen näytteen arvot ovat keskenään lähes saman suuruisia, vaikka neljä viimeistä näytettä poikkeavat merkittävästi ensimmäisten neljän näytteen arvoista. Tämä viittaa siihen, että näytteet eivät ole tilastollisesti riippumattomia ja ne korreloivat keskenään. Varianssi ei anna johdonmukaista tulosta kuvan 11 näytteistä, eikä se kerro, että viereisten näytteiden poikkeama on pieni. [7, s. 50] On syytä mainita, että kuva 11 vain havainnollistaa epästationäärisyyttä eikä sen toteaminen pienestä näytemäärästä ole

perusteltua.



Kuva 11: Epästationäärinen prosessi. Kuvitteellinen jatkuva-aikainen signaali $y(t)$ on näytteistetty näytteiksi y_i . Koko näytesignaalin keskiarvo on \bar{y} . Ensimmäisten yhdeksän näytteen keskiarvo on \bar{y}_{\bullet} ja viimeisten yhdeksän näytteen keskiarvo \bar{y}_{\circ} .

Oskillaattorin kohinatyyppien aiheuttama taajuuden vaihtelu ei ole vakiokeskiarvoista eikä tilastollisesti riippumatonta. Varianssi ja keskihajonta eivät sovellu atomikellojen stabiilisuuden analyysiin, vaan siihen joudutaan käyttämään jotakin muuta tilastollista menetelmää. [24, s. 3] Yleisin oskillaattorin stabiilisuuden tutkimukseen käytetty tilastollinen menetelmä on nimeltään Allan-varianssi (engl. Allan variance, AVAR). [19, s. 10,14]

5 Allan-varianssi

Vuonna 1964 tekniikan alan järjestö Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) perusti komitean, jonka tarkoituksena oli yhdenmukaistaa taajuuden ja vaiheen epästabiilisuuden mitat. Komitean ehdotus valmistui vuonna 1969. [25] Nykyisen IEEE 1139–2008 standardin mukaan epästabiilisuus ilmoitetaan taajuustasossa vaihekohina $\mathcal{L}(f)$ eli kuvan 10 tapaisesti. Aikatasossa standardi määrittää epästabiilisuuden mittariksi Allan-deviaation (engl. Allan deviation, ADEV). [18, s. 2–3]

Taajuusnormaalien ja muiden oskillaattorien spesifikaatioissa laitteen stabiilisuus ilmoitetaan lähes poikkeuksetta Allan-deviaationa. Tässä luvussa perehdytään David W. Allanin mukaan nimettyyn Allan-varianssiin $\sigma_y^2(\tau)$ ja siitä johdettuun Allan-deviaatioon $\sigma_y(\tau)$.

5.1 Teoria

Hetkellistaajuus $f(t)$ ja vaiheen vaihtelu $\phi(t)$ liittyvät toisiinsa yhtälön (4) mukaisesti. Oskillaattorin stabiilisuutta voidaan tutkia siis vaiheen stabiilisuuden avulla. Vaiheen vaihtelu aiheuttaa aikavirheen (engl. time error tai time fluctuation)

$$x(t) = \frac{\phi(t)}{2\pi f_0} \quad (12)$$

jonka yksikkö on sekunti. [7, s. 47] Aikavirhe $x(t)$ syntyy, koska oskillaattorin taajuus poikkeaa ideaalisesta nimellistaajuudesta. Sen voidaan ajatella kuvaavan sitä, paljonko oskillaattori jättää tai edistää ideaalista oskillaattoria ajanhetkellä t . Aikavirhettä kutsutaan joskus myös vaihevirheeksi tai vaihepoikkeamaksi. Aikavirhettä tarvitaan Allan-varianssin määritelmässä. Allan-varianssin yhtälö on

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \rangle. \quad (13)$$

Kirjoittamalla yhtälön odotusarvon hakasulkeet auki

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \quad (14)$$

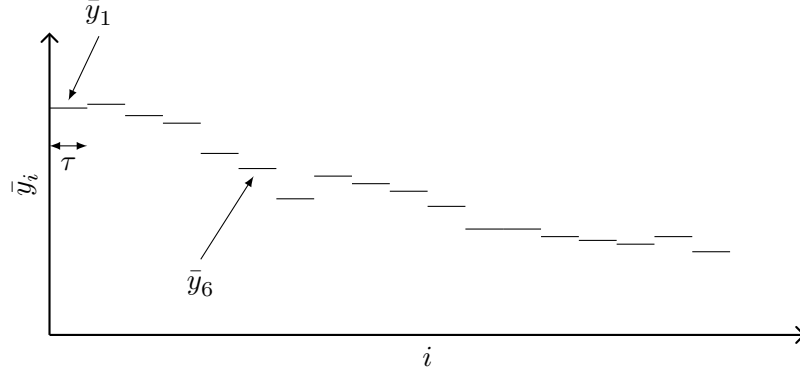
jossa M on mittausten lukumäärä ja

$$\bar{y}_i = \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{\tau} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau} \quad (15)$$

ja jossa x_i on mitattu aikavirhe ja τ on mittausten x_i välissä kulunut aika eli keskiarvoistusaika.

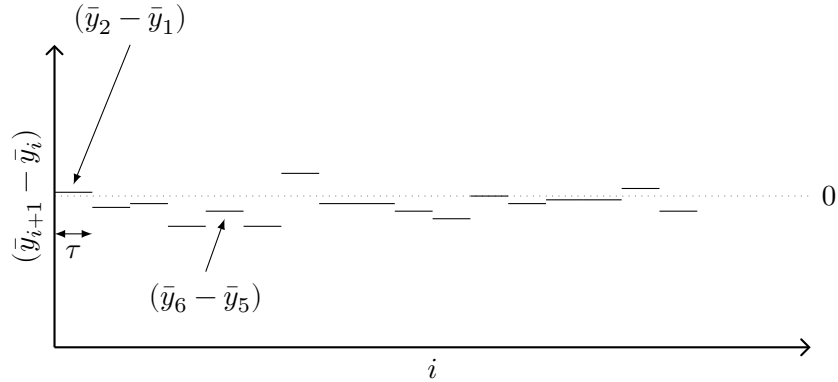
Yhtälö (14) muistuttaa läheisesti tavallisen varianssin yhtälöä (10) ja Allan-

varianssia kutsutaankin kahden näytteen varianssiksi (engl. two sample variance). AVAR:n ja tavallisen varianssin erona on, että AVAR perustuu peräkkäisten näytteiden poikkeamaan, kun taas tavallinen varianssi perustuu näytteiden poikkeamaan näytekeskiaarvosta \bar{y} . Allan-varienssi etuna on, että sen estimaatti tarkentuu sitä enemmän, mitä enemmän näytteitä otetaan, vaikka atomikelloissa esiintyvien kohinatyyppien aiheuttaman vaihtelu ei ole stationääristä. [19] AVAR:n hyöty on havainnollistettu kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12: Kuvassa on esitetty \bar{y}_i arvot, jotka on laskettu yhtälön (15) mukaan. Kuvan sarja vaikuttaa epästationääriseltä ja varianssin estimaatti hajaantuu. [7, s. 48]

AVAR:ssa on myös varianssista poiketen skaalauskerroin $\frac{1}{2}$. Kerroin on lisätty AVAR:n yhtälöön, jotta sen tulos olisi yhtä suuri kuin tavallisen varianssin silloin, kun signaali on satunnaista ja korreloimatonta, kuten valkoista kohinaa [26].



Kuva 13: Allan-varienssin yhtälön (13) komponentti $\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i$ laskettuna kuvan 12 arvoista. Kuvan perusteella vaikuttaa, että Allan-varienssin estimaatti ei hajaannu. [7, s. 48]

Sijoittamalla yhtälö (15) yhtälöön (14), ja tekemällä $N = M + 1$ aikavirhemittauksista x_i , saadaan Allan-varienssi aikavirheen mukaan

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2)} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2. \quad (16)$$

5.2 Esimerkki

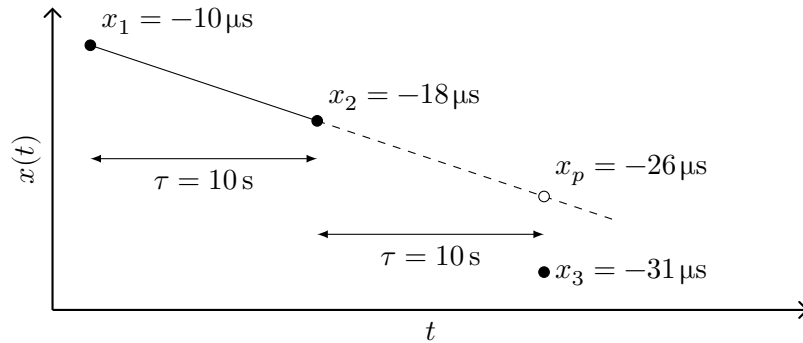
Myöhemmin tässä työssä arvioidaan K013 laboratorion hankkimia taajuusnormaaleja aikavirheen ja vaihekohinan mittaukseen erikoistuneella Symmetricom 5115A Phase Noise Test Set -laitteella. Lisäksi Allan-varianssi ja Allan-deviaatio ovat tavallista varianssia ja keskihajontaa harvemmin käytettyjä tilastollisia suureita. Työn paremman ymmärtämisen kannalta tässä luvussa käydään läpi yhtälön (16) toimintaperiaate esimerkin avulla.

Kuvitellaan, että halutaan tutkia jonkin oskillaattorin stabiilisuutta. Oskillaattoria verrataan tarkkaan referenssiin tekemällä aikavirhemittaus x_1 , jolloin aikavirheeksi saadaan $-10\mu\text{s}$. Nyt tiedetään, että oskillaattorin vaihe on $10\mu\text{s}$ referenssiä jäljessä. Kymmenen sekunnin päästä ($\tau = 10\text{s}$) tehdään toinen aikavirhemittaus x_2 ja tulokseksi saadaan $-18\mu\text{s}$. Aikavirhe kasvoi $8\mu\text{s}$. Jos oskillaattorin taajuus olisi sama kuin referenssi, ei aikavirhe olisi kasvanut mittausten x_1 ja x_2 välillä. Toisen mittauksen perusteella tiedetään, että oskillaattorin taajuus on referenssiä pienempi eli oskillaattori jätättää.

Aikavirhe kasvaa lineaarisesti, jos oskillaattorin taajuus on täysin stabiili. 10 sekunnin kuluttua x_2 -mittauksesta aikavirheen pitäisi olla

$$x_p = -18\mu\text{s} - 8\mu\text{s} = -26\mu\text{s}.$$

Tehdään kolmas mittaus x_3 , jonka tulos on $-31\mu\text{s}$. Oskillaattori on jätättänyt $5\mu\text{s}$ enemmän kuin edellä on päätelty. Mittaustulokset ja päättely x_p on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14: Mittausten x_i ja päättelyn x_p tulokset. Täysin stabiilin oskillaattorin aikavirhe muuttuu lineaarisesti ja sen aikavirheen kuvaaja $x(t)$ kulkee pisteiden x_1 ja x_2 kautta jatkaen katkoviivaa eteenpäin. Todellisuudessa taajuus on epästabiili eikä aikavirhe muutu lineaarisesti.

Kun mittaustulokset sijoitetaan Allan-varianssin yhtälöön (16), saadaan

$$\begin{aligned}
x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i &= \\
x_3 - 2x_2 + x_1 &= \\
(-31 \mu\text{s}) - 2(-18 \mu\text{s}) + (-10 \mu\text{s}) &= -5 \mu\text{s}.
\end{aligned}$$

Tulos $-5 \mu\text{s}$ on sama kuin mittauksen x_3 ja päättelyn x_p erotus. Toisin sanoen tulos on mittaustuloksen x_{i+2} poikkeama mittaustulosten x_{i+1} ja x_i perusteella oletetun ideaalisen täysin stabiilin oskillaattorin aikavirheestä. Mitä suurempi poikkeama, sitä suurempi Allan-varianssi ja sitä epästabiilimpi oskillaattori on. AVAR:n tulos tarkentuu, kun aikavirhemittauksia tehdään lisää. Keskiarvoistusaika τ ilmoitetaan aina tuloksen yhteydessä.

5.3 Lomittainen Allan-varianssi

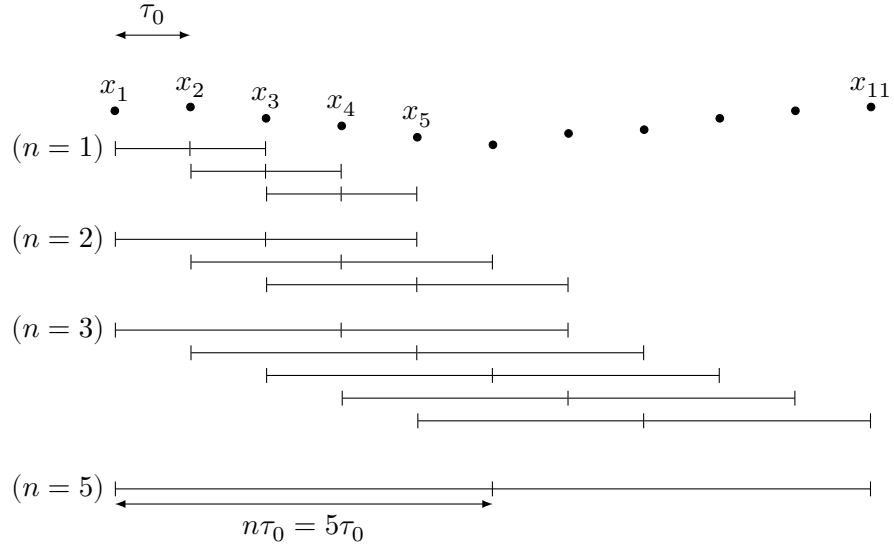
Yhtälön (16) Allan-varianssin muoto on nimeltään lomittamaton Allan-varianssi (engl. non-overlapped Allan-variance), koska τ on vakio ja yhtälön tulos antaa AVAR:n vain keskiarvoistusajalle τ . Jos oskillaattoria halutaan tutkia kahdella eri τ :n arvolla, pitää mittaus suorittaa molemmille keskiarvoistusajoille erikseen.

IEEE suosittelee niin kutsutun lomittaisen Allan-varianssin käyttöä (engl. overlapped Allan-variance), jossa oskillaattorin AVAR saadaan muodostettua useammalle eri keskiarvoistusajalle yhden mittauksen avulla [18, s. 9]. Menetelmä toimii siten, että keskiarvoistusaika on τ_0 ja AVAR lasketaan halutulle τ :n arvoille τ_0 :n moninkertana n . Toisin sanoen $\tau = n\tau_0$ ja sijoittamalla se yhtälöön (16), saadaan lomittaisen Allan-varianssin yhtälö

$$\sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2n^2\tau_0^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2. \quad (17)$$

Lomittaisella Allan-varianssilla pystytään mittaustuloksista muodostamaan mahdollisimman monta lomittaista sarjaa mahdollisimman monelle eri ajanjaksolle. Mittaustulosten lomittaisen hyödyntämisen ansiosta luottamusväli on näin parempi kuin yhtälöllä (16), kun $n > 1$. [18, s. 9] Lomittaisen Allan-varianssin hyöty on myös siinä, ettei keskiarvoistusaikaa tarvitse päättää etukäteen, joten AVAR pystytään laskemaan samasta mittaustiedosta reaaliaikaisesti tai jälkikäteen halutuille τ_0 :n moninkerroille. Kuvasta 15 nähdään, kuinka yhden mittauksen perusteella voidaan laskea oskillaattorin AVAR usealle keskiarvoistusajalle kerrointa n muuttamalla.

Allan-varianssin estimaatti on epäluotettava, kun $\tau = n\tau_0$ on enemmän kuin 10 % koko mittauksen kestosta. Esimerkiksi jos $\tau_0 = 1 \text{ s}$ ja ja mittauksen kesto on 60 s ei AVAR:n estimaatti ole luotettava, kun $n > 6$. [18, s. 10]



Kuva 15: Lomittaisen Allan-varianssin toimintaperiaate. Pisteet ovat mitattuja vaihepoikkeamia x_i . Yhtälön (17) summalausekkeen polynomiin sijoitettavat arvot ovat janojen päissä ja keskellä pystyviivojen kohdilla. Kuvaan on piirretty $n = 1$ ja $n = 2$ -moninkertojen kolme ensimmäistä tapausta. Lisäksi $n = 4$ on jätetty kokonaan piirtämättä. [19, s. 15]

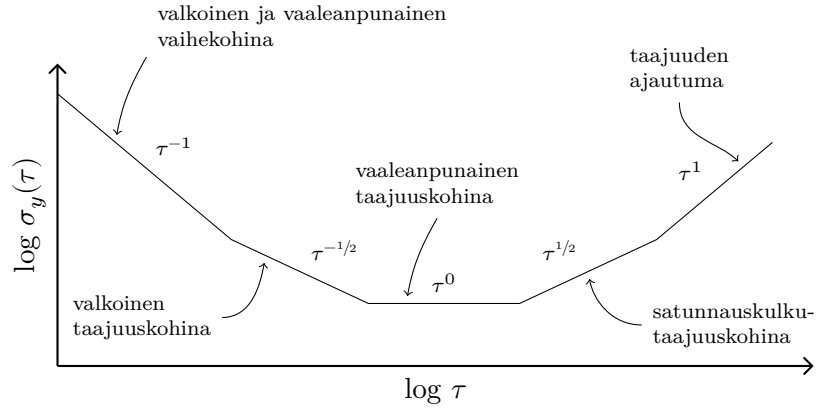
5.4 Allan-deviaatio

Oskillaattorin stabiilisuus ilmoitetaan Allan-varianssin neliöjuurena eli Allan-deviaationa. Allan-varianssin ja Allan-deviaation suhde on sama kuin varianssin ja keskihajonnan. Allan-deviaatio on

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)}. \quad (18)$$

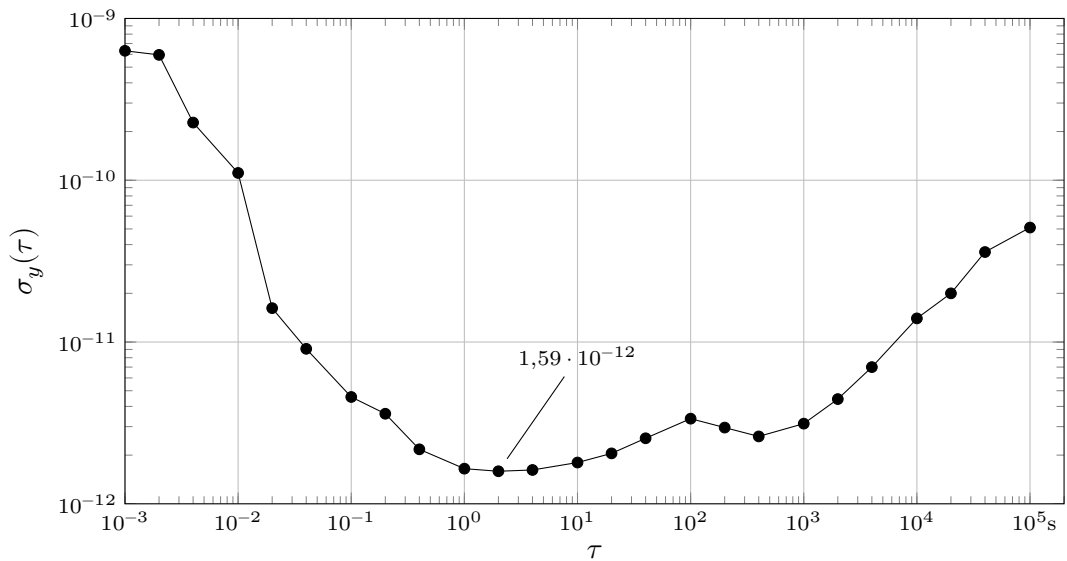
Oskillaattorin stabiilisuus hertseissä saadaan kertomalla ADEV oskillaattorin taajuudella. Esimerkiksi ADEV 2,2 mHz, kun $\tau = 10$ s tarkoittaa, että oskillaattorin taajuuden keskihajonta kahden 10 sekunnin päässä toisistaan olevien mittausten välillä on 2,2 mHz.

ADEV:n arvoista piirretään yleensä log-log-kuvaaja, jossa ADEV nähdään eri τ :n arvoilla. ADEV-kuvaaja on tyypillisesti U:n muotoinen käyrä, joka johtuu aikaisemmin mainituista viidestä kohinatyyppistä. Kuvaajasta 16 nähdään, ettei Allan-deviaatio pysty erottelemaan valkoisen ja vaaleanpunaisen vaihekohinan vaikutuksia. Molemmat kohinat näkyvät ADEV-kuvaajassa τ^{-1} -kulmakertoimisena suorana. Oskillaattorin stabiilisuuden raja muodostuu vaaleanpunaisen taajuuskohinan aiheuttamasta pohjakohinasta (engl. flicker floor), joka näkyy ADEV-kuvaajassa τ^0 -kulmakertoimisena segmenttinä [7, s. 63]. Isoilla τ :n arvoilla kuvaaja alkaa kääntyä ylöspäin. Ennen pitkää siitä voi alkaa havaita myös τ^1 -kulmakertoimista segmenttiä, joka johtuu oskillaattorin taajuuden ajautumasta, esimerkiksi kiteen ominaisuuk-



Kuva 16: Viiden kohinatyyppin vaikutus Allan-deviaation kuvaajan muodostumiseen. Kohinatyyppien järjestys vaihtuu, kun siirrytään $\mathcal{L}(f)$ kuvaajan taajuustasosta ADEV:n aikatasoon. [18; 27]

sien muuttumisesta. [19, s. 9] Todellisuudessa ADEV-kuvaaja ei ole symmetrinen, kuten kuvassa 16, mikä johtuu siitä, ettei kohina jakaudu tasaisesti jokaiseen kohinatyyppiin. Kuvassa 17 on esimerkki HP 53132A -taajuuslaskimen sisäisen 10 MHz oskillaattorin stabiilisuudesta. Kuvaaja on laskettu 1 ms välein tehdyistä aikavirhemittauksista.



Kuva 17: HP 53132A:n 10 MHz oskillaattorin stabiilisuus. Taajuuslaskimen taajuus on stabiileimmillaan, kun τ on 2 sekuntia.

Mitatun Allan-deviaation mittausepävarmuus riippuu siitä, onko tuloksen saamiseksi käytetty lomitettua vai lomittamatonta Allan-varianssia. Lomittamattoman Allan-deviaation mittausepävarmuutta vakiolla τ :n arvolla voidaan approksimoida yhtälöllä

$$I_\alpha = \frac{\sigma_y(\tau)\kappa_\alpha}{\sqrt{N-1}} \quad (19)$$

jossa I_α on epävarmuus, κ_α on kohinatyyppin kerroin, α on kohinatyyppin tunnusindeksi ja N on aikavirhemittausten lukumäärä. Yhtälö (19) pätee silloin, kun $N \geq 9$. Kertoimet κ_α on taulukoitu liitteessä A. [18, s. 26] Lomittamattoman ADEV-tuloksen standardiepävarmuutta $\sigma_{\bar{y}}$ voidaan myös arvioida nopeasti ja melko tarkasti yhtälöllä

$$\sigma_{\bar{y}} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{N}}. \quad (20)$$

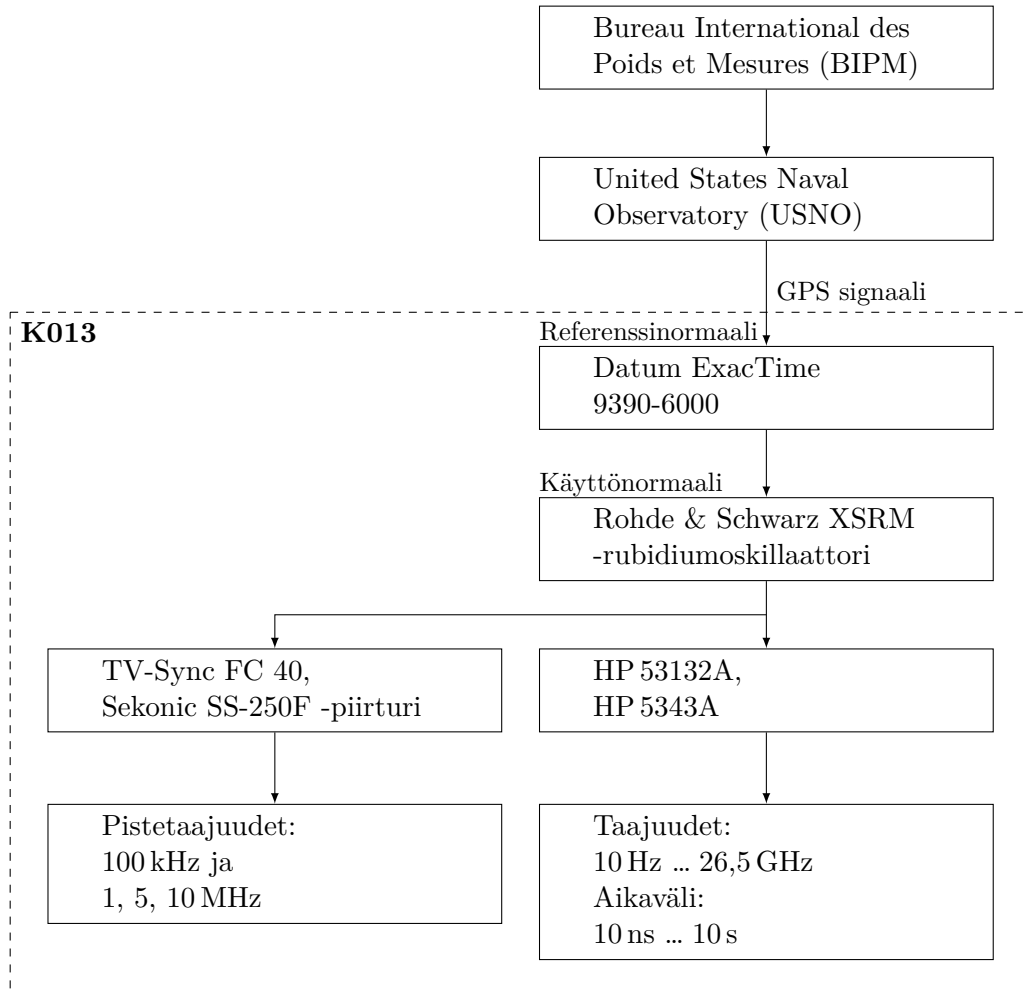
Lomitettun Allan-varianssin avulla lasketun Allan-deviaation epävarmuuden laskemiseen täytyy käyttää χ^2 -jakaumaa (engl. chi-squared distribution)

$$\chi^2 = (df) \frac{\hat{\sigma}_y^2}{\sigma_y^2} \quad (21)$$

jossa (df) on vapausasteiden määrä, $\hat{\sigma}_y^2$ on mitattu Allan-varianssi ja σ_y^2 on todellinen Allan-varianssi. Vapausasteiden lukumäärä riippuu kohinatyyppistä. Kohityyppien vaikutusta on tutkittu kokeellisesti, ja kokeiden perusteella päädytty kohinatyyppien vapausasteiden laskemiseen käytettäviin yhtälöihin, jotka on myös taulukoitu liitteessä A. [18, s. 26–28]

6 K013-laboratorion vanha järjestelmä

K013-laboratorion tarkoituksena on pitää vanha laitteisto toimintakykyisenä siirtymävaiheessa ennen uuden laitteiston akkreditointia ja käyttöönottoa. Tässä luvussa esitellään lyhyesti vanhan järjestelmän laitteisto, mittauskkyky ja mittaustoiminta. Järjestelmän jäljitettävyysskaavio on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18: K013-laboratorion vanhan järjestelmän jäljitettävyysskaavio. Laboratorion laitteisto on katkoviivalla rajatun alueen sisällä. Referenssinormaali on jäljitettävissä UTC:hen GPS-satelliittien ja UTC(USNO):n kautta.

6.1 Laitteisto

K013-laboratorion käyttönormaalina on toiminut vuodesta 1990 Rohde & Schwarzin vapaasti värähtelevä XSRM rubidiumoscillaattori (R&S XSRM). Käyttönormaali on edelleen toimiva mutta ikääntynyt. Esimerkiksi rubidiumstandardeissa olevien rubidiumkaasua sisältävien lamppujen käyttöikä on tyypillisesti 10–20 vuotta [7, s. 248]. Lisäksi R&S XSRM:n sisäinen virtalähde rikkoontui vuonna 2010 ja laite on toiminut siitä lähtien ulkoisen virtalähteen avulla.

Referenssinormaalina laboratoriolle on ollut käytössä Datum ExacTime 9390-6000. Laboratorion katolla on GPS-antenni, jonka vastaanottama GPS-signaali kulkee laboratorion sisällä olevaan signaalinjakajaan ja siitä edelleen Datum ExacTime -laitteeseen. Myös Datum ExacTime sisältää rubidiumoskillaattorin. Laite on viimeksi huollettu vuonna 1999 ja ExacTime on toiminut siitä lähtien moitteetta. Laitteen spesifikaation mukaan sen huoltovapaa tavoiteikä on ”yli kymmenen vuotta” [28, s. 1].

HP 53132A- ja HP 5343A -taajuuslaskimia on käytetty taajuus- ja aikavälimittauksissa siten, että R&S XSRM -käyttönormaali on toiminut niiden ulkoisena taajuusreferenssinä. Laitteet ovat toimineet moitteetta.

Järjestelmän vaihevertaajana on käytetty TV-Sync FC 40 -laitetta, joka muuttaa referenssi- ja testilaitteen (engl. device under test, DUT) vaihe-eron jännitteeksi. Sekonic SS-350F -piirturi tulkitsee jännitteen ja piirtää paperille viivaa, joka kuvaa laitteiden välisen vaihe-eron kehitystä ajan suhteen. Molemmat laitteet ovat vanhoja, ja laiteyhdistelmässä on häiriötä, joka on ilmennyt piirturin neulan epävakaana käyttäytymisenä.

Laboratorion henkilöstön arvion mukaan laitteista päivityksen tarpeessa ovat Datum ExacTime 9390-6000 -referenssinormaali, Rohde & Schwarz XSRM -käyttönormaali, Sekonic SS-250F -piirturi ja TV-Sync FC 40 -vaihevertaaja. Taajuuslaskimia ei ole tarve päivittää, ja vaikka niissä ilmenisi tulevaisuudessa käyttöhäiriöitä, on laitteiden korvaaminen samankaltaisilla laitteilla helppoa. Laitteiston modernisoinnin tavoitteena on akkreditoinnin säilyttäminen, eikä laboratoriolle ole henkilöstön arvion mukaan tarvetta mittauskyvyn parantamiseen.

6.2 Mittaustoiminta

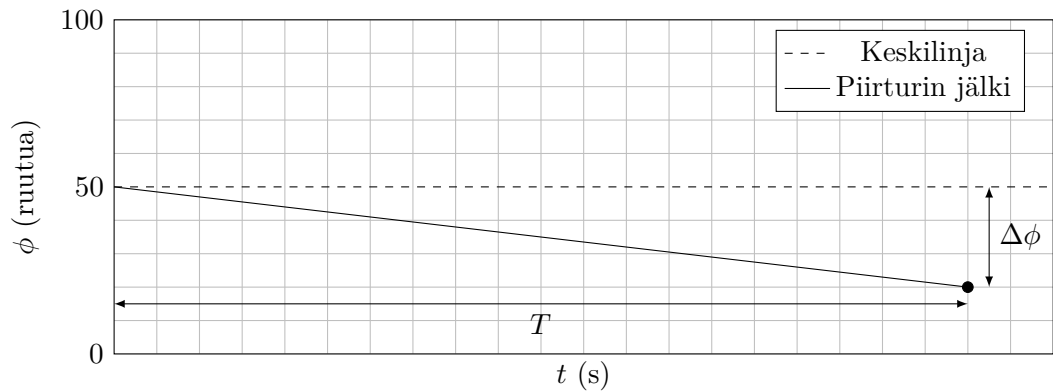
Pistetaajuuksia on mitattu TV-Sync FC 40 -vaihevertaajalla ja Sekonic SS-350F -piirturilla siten, että R&S XSRM -käyttönormaali on kytketty vaihevertaajan referenssiin ja testilaitte sisäänmenoon. Piirturin asetukset, kuten paperin syöttönopeus ja neulan herkkyys, on säädetty mitattavan taajuuden mukaan, piirturin neula asetettu paperin keskilinjalle ja piirturi kytketty päälle. Mittauksen on annettu jatkua neljä tuntia. Piirturi on piirtänyt 30 minuutin välein kanttiaallon muotoisen merkin, joiden perusteella neljän tunnin mittausjakson alku- ja loppukohta on havaittu tarkasti. Testilaitteen suhteellinen taajuuspoikkeama f_{off} on laskettu mittauksen jälkeen yhtälöllä

$$f_{\text{off}} = \frac{\Delta\phi/f_0}{T} \quad (22)$$

jossa $\Delta\phi$ on piirturin viivan poikkeama keskilinjasta paperin ruuduissa mitattuna, f_0 on nimellistaajuus ja T on mittausaika eli $4\text{ h} = 14400\text{ s}$. Piirturin jälkeä on

havainnollistettu kuvassa 19. Viivan poikkeama on kuvassa tarkoituksella liioiteltu.

R&S XSRM -käyttönormaali on kalibroitu ja ajautumaa seurattu kuukausittain tehtävällä kuukausiajolla, joka on toteutettu muilta osin samoin kuin pistetaajuuksien mittausta, mutta vaihevertaajan referenssiin on kytketty Datum ExacTime 9390-6000 ja sisäänmenoon R&S XSRM. Mikäli R&S XSRM -käyttönormaanin suhteellinen taajuuspoikkeama on ollut suurempi kuin $1,3 \cdot 10^{-11}$ suhteessa referenssinormaaliiin, on käyttönormaanin taajuutta säädetty etupaneelissa olevan säätimen avulla ja suoritettu kuukausiajo uudestaan. Käyttönormaanin kuukausiajot on koottu vuosittain yhteen ja varmistettu siten, että laboratorio säilyttää akkreditointipäätöksen mukaisen mittauskyvyn pistetaajuuksille 100 kHz ja 1, 5, 10 MHz.

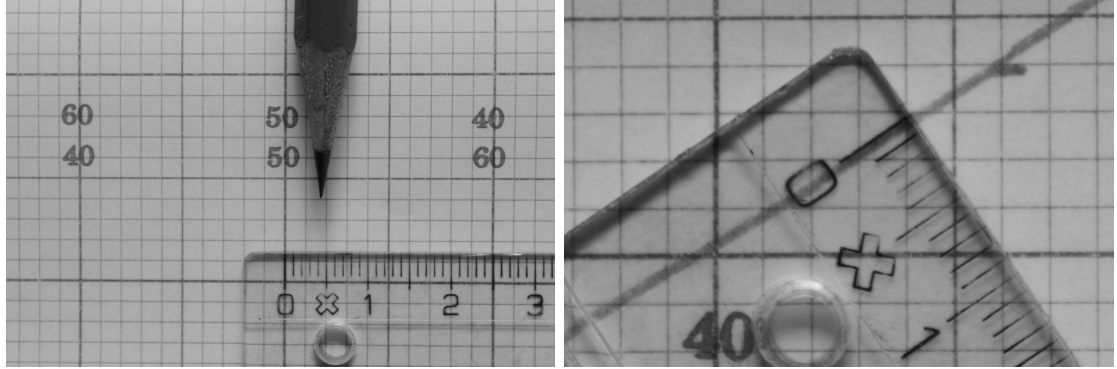


Kuva 19: Havainnekuva Sekonic -piirturin tuloksesta. Testattavan laitteen taajuuspoikkeama aiheuttaa vaiheen siirtymisen ja vaihe-ero suhteessa referenssiin kasvaa. Mitä vaakasuorempi piirturin viiva, sitä lähempänä testattavan laitteen taajuus on referenssitaaajuutta.

Muita taajuuksia kuin pistetaajuuksia mittausalueella 10 Hz ... 26,5 GHz ja aikaväliä mittausalueella 10 ns ... 10 s on mitattu HP 53132A- ja HP 5343A -taajuuslaskimilla siten, että käyttönormaali on toiminut taajuuslaskimien ulkoisena taajuusreferenssinä. HP 53132A -laitetta on käytetty taajuuksien mittaamiseen 500 MHz asti ja HP 5343A:ta mittausalueella 500 MHz ... 26,5 GHz. Aikavälimittauksiin on käytetty pelkästään HP 53132A:ta.

Vanhan järjestelmän heikkoutena on ikääntymisen lisäksi vaihevertaajan ja piirturin aiheuttama epävarmuus. Käyttönormaanin kalibroinnin eli kuukausiajon epävarmuusbudjetissa vaihevertaajan ja piirturin epävarmuusosuus on 62,4 % koko mittauksen epävarmuudesta. Lisäksi piirturi ja vaihevertaaja vaikuttavat pistetaajuuksien mittauksissa tuloksen epävarmuuteen toistamiseen, kun laitteita käytetään käyttönormaanin kalibroinnin jälkeen myös DUT:n mittaamiseen. Piirturin epävarmuus on konkretisoitu kuvassa 20.

Laboratorion aikavälin ja taajuuden akkreditoitu mittauskyky on esitetty taulukossa 2. Taulukossa esiintyvä luku $3 \cdot 10^{-11}$ on työn kannalta tärkeä. Kun käyttö-



Kuva 20: Piirturin aiheuttama epävarmuus. Vasemmassa kuvassa on esitetty piirturin paperin resoluutio. Yhden ruudun leveys on hieman yli 2 mm. Oikeanpuoleisessa kuvassa on piirturin viivan paksuus, joka on noin 0,5 mm. Käyttönormaanin vaihepoikkeama kuu-kausijossa on yleensä vähemmän kuin yksi ruutu. Piirturi vaikuttaa siis merkittävästi tuloksen epävarmuuteen.

normaali on ollut taajuuslaskinten ulkoisena referenssinä, on laskinten kiteen epävarmuuksina (engl. time base error) käytetty suhteellista epävarmuutta $3 \cdot 10^{-11}$ tai $4 \cdot 10^{-11}$ riippuen laskimesta. Tämä tarkoittaa, että taajuuslaskimilla tehtävien mittausten akkreditoitu mittaussyky säilyy ennallaan, jos uuden käyttönormaanin taajuuden laajennettu suhteellinen epävarmuus on $< 3 \cdot 10^{-11}$. Lisäksi uuden järjestelmän käyttönormaanin ja pistetaajuuksien mittaustaitteiston yhdistetyn epävarmuuden pitää olla $< 3 \cdot 10^{-11}$, jolloin pistetaajuuksien akkreditoitu mittaussyky säilyy.

Taulukko 2: K013-laboratorion aikavälin ja taajuuden mittaussyky. [29]

Suure	Mittausalue	Mittaussyky ($k = 2$)
Taajuus	10 Hz ... 500 MHz	$4 \cdot 10^{-10} \cdot f + 0,1 \text{ mHz}$
	0,5 GHz ... 5 GHz	$3 \cdot 10^{-9} \cdot f + 1 \text{ Hz}$
	5 GHz ... 26,5 GHz	$3 \cdot 10^{-10} \cdot f + 1 \text{ Hz}$
	100 kHz	$3 \cdot 10^{-11} \cdot f$
	1 MHz	$3 \cdot 10^{-11} \cdot f$
	5 MHz	$3 \cdot 10^{-11} \cdot f$
	10 MHz	$3 \cdot 10^{-11} \cdot f$
Aikaväli	10 ns ... 10 s	$2 \cdot 10^{-11} \cdot t + 4 \text{ ns}$

7 K013-laboratorion uusi järjestelmä

Tässä luvussa käydään läpi laboratorion hankkimat uudet laitteet ja uuden järjestelmän suunnittelu. Pistetaajuuksien mittaamista varten ohjelmoitiin Labview-sovellus, jonka toiminta selitetään. Uudessa Symmetricom 5115A Phase Noise Test Set -vaihevertaajassa ilmeni työn aikana ongelmia, jotka analysoidaan tarkemmin. Työn kannalta olennaisimmat laitteiden spesifikaatiot on esitetty liitteessä B.

Laitehankinnat oli tehty ennen tämän työn alkua. Laitteiden toimittaja oli suomalainen Positron Oy.

7.1 Laitteisto

Laboratorio oli hankkinut kaksi Symmetricomin XLi Time and Frequency System taajuusnormaaleja (XLi). Kahden laitteen hankinnan perusteena oli järjestelmän parempi vikasieto, aikatietopalvelimen tarve ja kyky käyttää toista laitetta siirtonormaalina. Molemmat laitteet on varustettu 86-8008- ja 87-8009-10 -moduuleilla. 86-8008-moduulin neljä ulostuloa voidaan ohjelmoida 1, 5, 10 MHz tai 1, 5, 10 MPPS kantti- tai siniaaltoulostuloiksi. 87-8009-10-moduulin neljä ulostuloa ovat pienikohinaista 10 MHz sinisignaalia. XLi:n takapaneelissa on myös 1 PPS ulostulo. Ulostulot on lukittu sisäiseen rubidiumoskillaattoriin, joka ohjautuu laitteen vastaanottamalla GPS-signaalilla. Ilman yhteyttä GPS-satelliitteihin laitteen oskillaattori siirtyy vapaasti värähtelevään (engl. holdover, flywheel, freewheel) tilaan. XLi-laitteita voidaan hallinnoida telnet-yhteyden ja verkkoselaimen kautta. [30]

Laboratorio oli hankkinut myös Symmetricom 8040C -rubidiumkaasukennonormaalin. Laite on toiminnaltaan yksinkertainen: laitetta voi käyttää vapaasti värähtelevässä tilassa, mutta se voidaan lukita 1 PPS signaaliin kytkemällä ulkoinen 1 PPS signaali takapaneelin 1 PPS IN -porttiin. Lukitus ulkoiseen signaaliin tapahtuu alle viidessä minuutissa, jos ulkoinen signaali on 8040C:n tekemän arvion mukaan riittävän hyvä. Lukituksen merkiksi etupaneeliin syttyy 1 PPS LOCK -valo. Laitteessa on 1 PPS sekä 1, 5 ja 10 MHz ulostulot. [31]

TV-Sync -vaihevertaajan ja Sekonic-piirturin korvaajaksi oli hankittu Symmetricom 5115A Phase Noise Test Set. 5115A:lla pystyy mittaamaan Allan-deviaatiota, vaihekohinaa, taajuuspoikkeamaa ja vaihe-eroa. Lisäksi laite toimii taajuuslaskimena. Mittausta varten laite vaatii aina ulkoisen taajuusreferenssin.

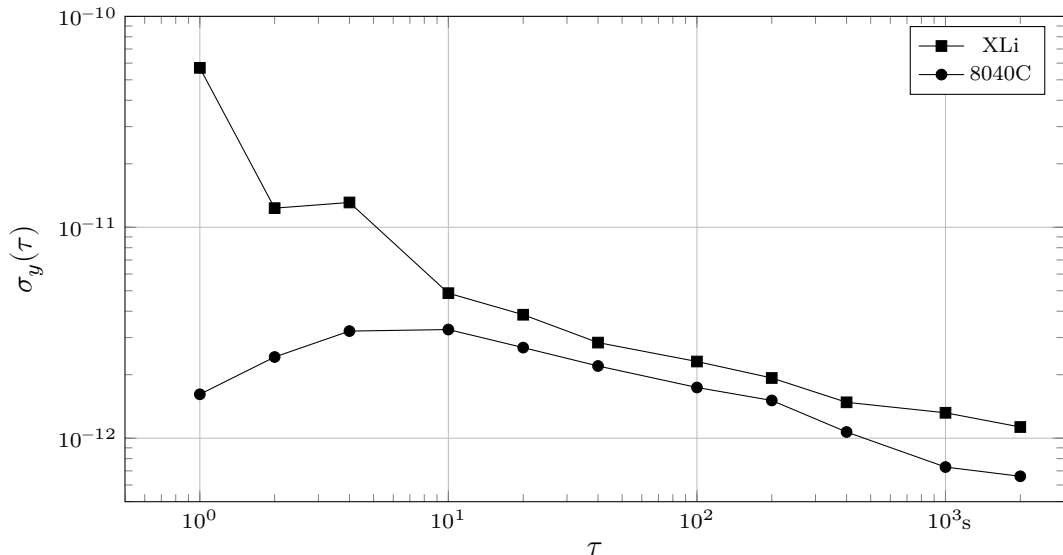
5115A:ta käytetään valintanäppäinten avulla, hiirellä tai etänä telnet-yhteyden kautta. Telnet-yhteys voidaan ottaa laitteen komento- tai data-porttiin. Komentoporttia käytetään laitteen hallintaan, ja data-portista voidaan lukea 5115A:n mittaaman referenssi- ja testilaitteen vaihe-ero. Käyttäjä voi myös lukea valitun mittaustoiminnon tulokset etupaneelin nestekidenäytöltä tai komentaa telnet-yhteyden komentoriviltä laitetta näyttämään mittaustuloksia.

Mittaus laitteella aloitetaan kytkemällä referenssilaitte reference-liittimeen, DUT input-liittimeen ja painamalla start-näppäintä tai antamalla komentoriviltä komento `start`. Kaikki ruudulla näkyvät tulokset ovat tulostettavissa laitteeseen tai lähiverkkoon liitettyllä tulostimella. [32]

7.2 Uuden järjestelmän suunnittelu

Uuden järjestelmän referenssi- ja käyttönormaali oli mahdollista toteuttaa laboratorion hankkimilla laitteilla kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa oli lukita 8040C-laitte XLi:n GPS-lukittuun 1 PPS signaaliin. Tällöin XLi olisi referenssinormaali ja 8040C käyttönormaali. Toinen tapa oli käyttää pelkästään GPS-lukittua XLi:tä, jolloin se toimisi vanhan järjestelmän jäljitettävyysskaavion termein ilmaistuna yhtä aikaa sekä referenssi- että käyttönormaalina. Molempien toteutuksien pitkän ajan stabiilisuus ja tarkkuus riippuvat pääasiassa GPS-aikaisignaalista. Toisaalta lyhyen aikavälin suorituskky määräytyy molempien laitteiden sisäisen oskillaattorin mukaan, joissa voi olla suuriakin eroja.

Näiden kahden eri toteutustavan käyttökelpoisuutta arvioitiin alustavasti mittaamalla vaihtoehtojen Allan-deviaatio 5115A-vaihevertaajalla käyttäen referenssinä R&S XSRM -laitetta. Mittaukset suoritettiin kytkemällä R&S XSRM:n 10 MHz ulostulo 5115A:n reference-liittimeen ja testattavan laitteen 10 MHz ulostulo input-liittimeen. Molempien mittausten kesto oli noin 17 tuntia ja ne tehtiin peräkkäisinä päivinä. Tulokset on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21: XLi:n ja 8040C:n Allan-deviaatio, kun referenssinä on R&S XSRM. XLi:n sisäisen oskillaattorin lyhyen ajan stabiilisuus on huono eikä sen käyttäminen itsenäisesti laboratorion taajuusnormaalina ole siksi suositeltavaa.

Allan-deviaatio on aina referenssilaitteen ja DUT:n epästabiilisuuksien yhdis-

telmä. Koska molemmissa mittauksissa referenssinä oli sama laite, voitiin olettaa, että R&S XSRM vaikutti molempiin mittauksiin yhtä paljon. Tuloksen perusteella pystyttiin päättelemään, kumpi testilaitteista oli stabiilimpi pienillä τ :n arvoilla. Kuvasta 21 näkyy, että 8040C on lyhyellä aikavälillä XLi:tä stabiilimpi, ja järjestely, jossa 8040C on lukittuna XLi:n 1 PPS signaaliin, takaa todennäköisesti paremman suorituskvyn.

Sama, mutta lyhyempi mittaus tehtiin toiselle XLi:lle ja todettiin, että XLi-laitteiden suorituskvyy oli samankaltainen. Sekaannuksen välttämiseksi kuvan 21 XLi-laitteelle annettiin nimi "XLi GPS #1" ja toiselle nimi "XLi GPS #2". Nimet merkittiin tarroilla laitteiden etupaneeleihin.

XLi GPS #1:n kautta GPS-lukitun 8040C:n metrologinen jäljitettävyyks kansainväliseen mittanormaaliin voitiin ajatella tapahtuvan usealla eri tavalla. Esimerkiksi NIST:n Coloradossa sijaitseva laboratorio vertaa satelliittien lähettämää aikaisignaalia omaan UTC(NIST)-normaaliin, jonka mittaustulokset julkaistaan päivittäin NIST:n verkkosivuilla. Näin jäljitettävyysetju $8040C \rightarrow XLi\ GPS\ \#1 \rightarrow GPS\text{-aika}\text{-signaali} \rightarrow UTC(NIST) \rightarrow UTC$ oli mahdollinen. [11] Jäljitettävyysetju päätettiin kuitenkin säilyttää entisellään kuvan 18 tapaan, jossa käyttönormaali jäljitetään UTC:hen UTC(USNO):n kautta.

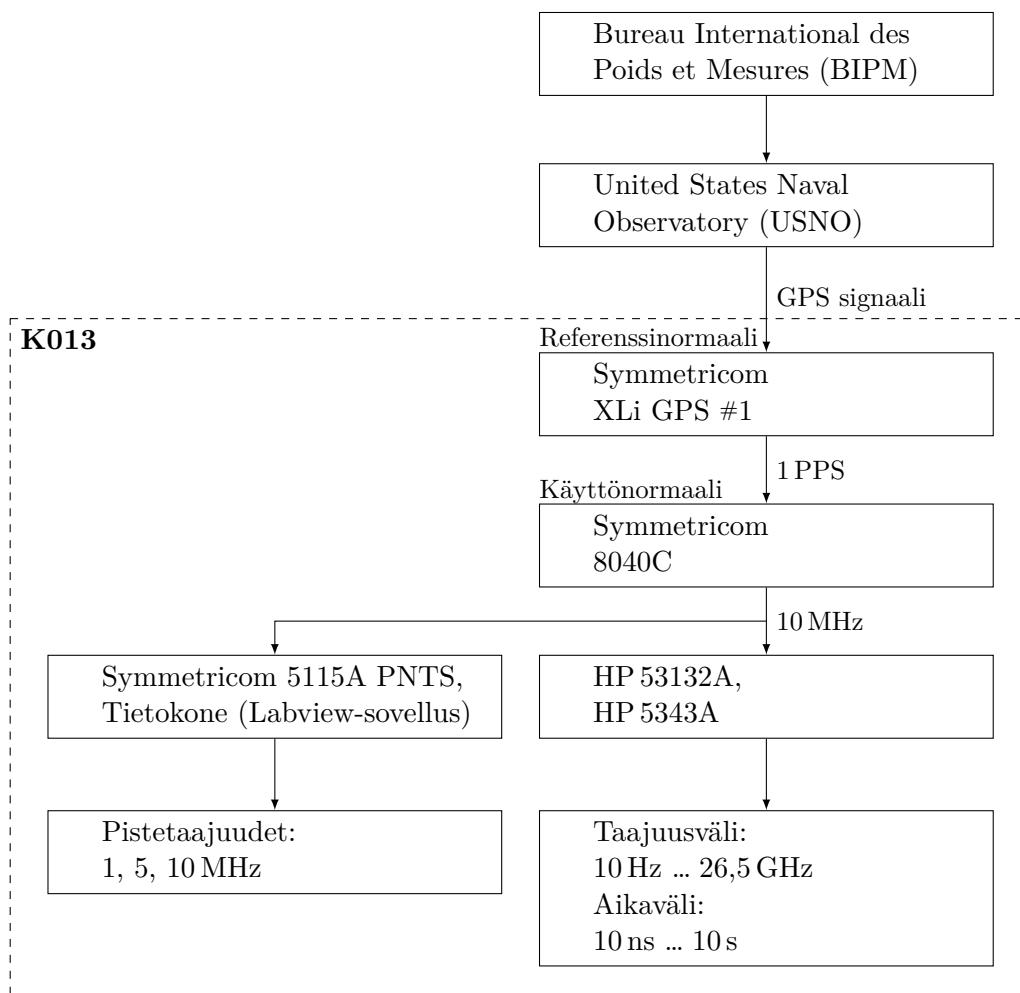
Uuden järjestelmän taajuusalueen 10 Hz ... 26,5 GHz ja aikavälin mittaussjärjestelmää ei tarvinnut tässä työssä suunnitella, koska laboratoriolle ei ollut tarvetta parantaa HP 53132A- ja HP 5343A -taajuuslaskimilla tehtävien mittausten mittausskyyä, eikä taajuuslaskimia ollut tarkoitus korvata uusilla tai erilaisilla laitteilla. Tältä osin tehtäväksi jäi ainoastaan varmistaa, että uuden järjestelmän käyttönormaalien suhteellinen laajennettu epävarmuus olisi $< 3 \cdot 10^{-11}$ ($k = 2$).

Pistetaajuuksien mittaamista varten hankitun 5115A:n toiminnot olivat monipuolisia, mutta mittaustiedon käsittely laitteen tarjoamilla menetelmillä työlästä. Symmetricomin teknisen tuen vastaukset kysymyksiin laitteen toiminnasta sisälsivät suoria lainauksia laitteen käyttöohjeesta ja kehotuksia hankkia TimeLab-tai Stable32-analysointiohjelma [33]. TimeLab ja Stable32 hyödyntävät data-portin kautta tulevaa vaihe-erotietoa. Vaihe-erotiedon avulla kaikki laitteen toiminnot on mahdollista toteuttaa 5115A:n kanssa samassa lähiverkossa olevalla tietokoneella. Analysointiohjelmaa ei hankittu ja pistetaajuuksien mittaamista varten ohjelmoitiin Labview-sovellus. Labview-sovelluksen toiminta on selitetty tarkemmin luvussa 7.3.

Uuden järjestelmän jäljitettävyysetkaavio on esitetty kuvassa 22. Aikaisemman analyysin mukaisesti XLi GPS #1 toimii referenssinormaalina ja 8040C käyttönormaalina. Käyttönormaali on lukittu XLi:n GPS-lukittuun 1 PPS ulostuloon ja käyttönormaalien 10 MHz ulostuloa käytetään HP 53132A:n, HP 5343A:n ja Symmetricom 5115A:n taajuusreferenssinä. 5115A:n referenssitaaajuutena voidaan käyttää 10 MHz signaalia, vaikka mitattava pistetaajuus olisikin jokin muu taajuus. 5115A:n

mittaama vaihe-erotieto siirtyy laboratorion sisäverkon tietokoneelle, jossa pistetaajuuksien mittaamiseen tehty Labview-sovellus on käynnissä.

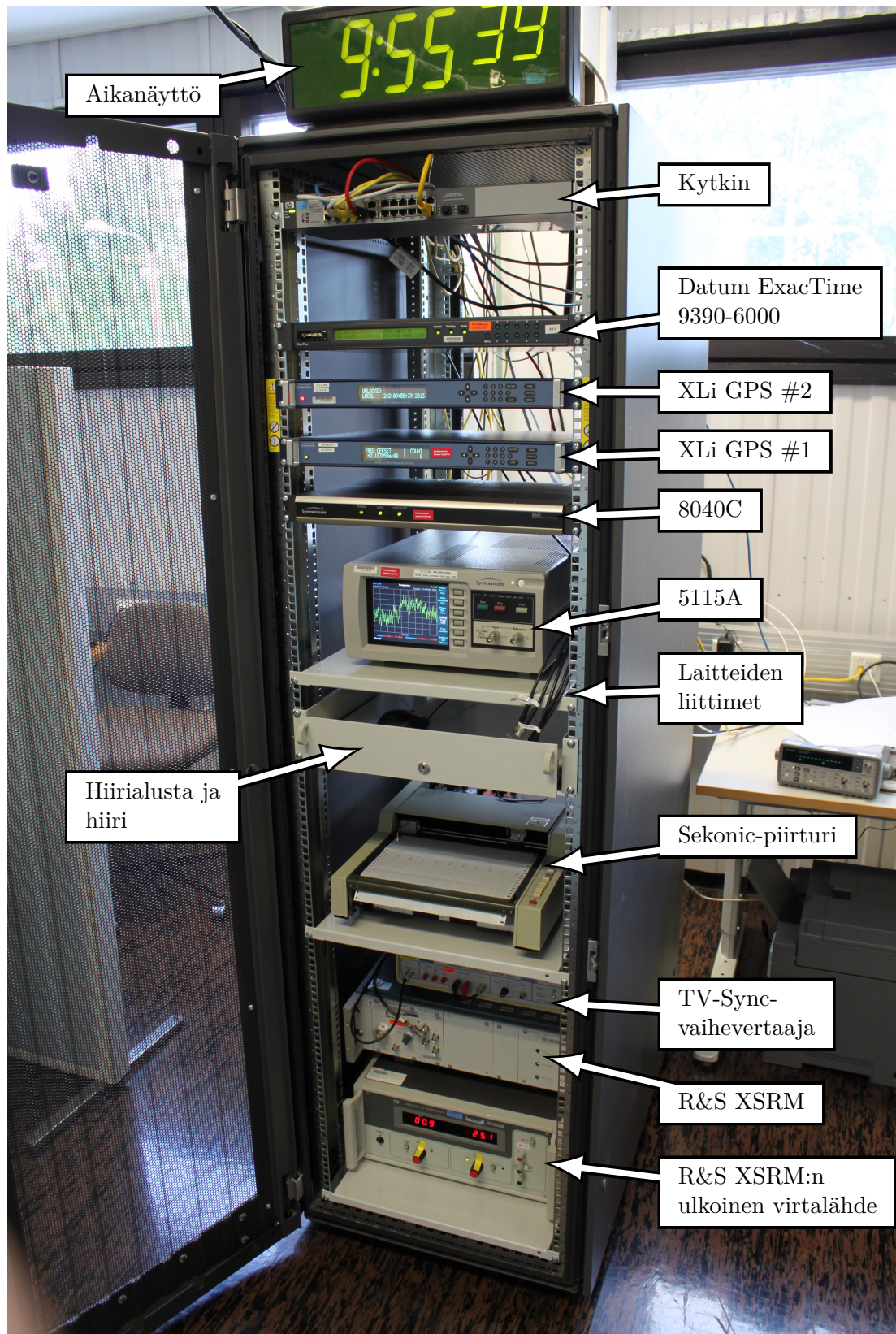
Tässä vaiheessa työtä havaittiin, että 5115A:lla ei pysty mittaamaan alle 1 MHz signaaleja. Tämä tarkoitti sitä, että laitteen pohjalta ei voinut rakentaa järjestelmää, joka kykenisi mittaamaan 100 kHz pistetaajuutta.



Kuva 22: K013-laboratorion uuden järjestelmän jäljitettävyysskaavio. Referenssinormaali, käyttönormaali ja piirturi-vaihevertaaja-yhdistelmä on korvattu uusilla laitteilla.

Vanhaa järjestelmää oli säilytetty laitekaapissa, joka oli varsin ahdas. Kaappi korvattiin aiempaa tilavammalla, 19 tuuman standardisoidulla laitekaapilla, johon vanhan järjestelmän laitteet siirrettiin ja uusi järjestelmä koottiin. Uusi laitekaappi näkyy kuvassa 23.

XLi:t, Datum ExacTime ja 8040C ovat yhden laiteyksikön (1U) korkuisia laitteita ja ne voitiin kiinnittää kaappiin siihen tarkoitetuilla ruuveilla. Muita laitteita varten kaappiin kiinnitettiin tasoja, joiden päälle ne asetettiin. Laitteet aseteltiin kaappiin aina mahdollisuuden mukaan siten, että laitteiden välille jäi riittävästi tilaa. Kaappiin kiinnitettiin alusta 5115A:n hallintaan käytettävälle hiirelle. 5115A ja molemmat XLi:t liitettiin kytkimen kautta laboratorion sisäverkkoon. Verkossa



Kuva 23: Uusi järjestelmä 19 tuuman laitekaappiin koottuna. Vanha järjestelmä on myös siirretty samaan kaappiin. Aikanäytön takana on anturi, joka seuraa laboratorion olosuhdeparametrejä. Taajuuslaskimia säilytetään laitekaapin oikealla puolella olevalla pöydällä.

olevien laitteiden IP-osoitteet merkittiin tarroilla laitteiden etupaneeleihin. Taajuusnormaalien takapaneelien ulostuloista vedettiin johdot kaapin etuosaan ja niihin merkittiin taajuusnormaalien nimet.

Kaikki kolme kaapin GPSDO-laitetta on mahdollista lukita samanaikaisesti GPS-signaaliin, sillä laboratorion katolla olevan GPS-antennin vastaanottama signaali tulee kaapin takana olevaan signaalinjakajaan, jossa on neljä ulostuloa.

XLi-laitteissa on aikapalvelinominaisuus, joka voidaan aktivoida valmistajalta ostettavalla koodilla. Koska XLi:t kytkettiin sisäverkkoon, aikapalvelimen ottaminen käyttöön on helppoa sitten, kun laboratorion henkilökunta kokee sen tarpeelliseksi. Lisäksi hankittiin aikanäyttö, joka asetettiin laboratorion olosuhteita seuraavan mittalaitteen kanssa laitekaapin päälle. Aikanäytöllä ei ole mittaustoiminnan kanssa mitään tekemistä, mutta se antaa järjestelmästä huolitellun kokonaiskuvan.

7.3 Pistetaajuuksien mittausohjelma

Pistetaajuuksien mittaamista varten ohjelmoitiin sovellus, joka laskee testilaitteen suhteellisen taajuuspoikkeaman 5115A:n data-portin vaihe-erotiedon perusteella. Mittausohjelma ohjelmoitiin käyttäen National Instrumentsin Labview 2012 -ohjelmointiympäristöä (NI Labview). Labview ei tukenut telnet-protokollaa, jota tarvittiin yhteyden ottamiseksi data-porttiin. Tietokoneeseen asennettiin NI:n Internet Toolkit, joka mahdollisti telnet-ohjelmointielementtien käytön.

5115A syöttää vaihe-erotietoa reaaliajassa siten, että vaihe-eron arvo ilmoitetaan liukulukuna ja luvun perässä on rivinvaihtokomento. Vaihe-erotiedon yksikkö on testilaitteen jakso [32, s. 67]. Vaihe-eron näytteistystaajuus oli laitteessa oletusarvoisesti 1000 Hz. Näytteistystaajuuden todettiin olevan tarpeettoman tiheä ja se aiheutti testausvaiheessa epästabiilisuuksia telnet-yhteydessä.

Laitteessa oli asennettuna neljä vuotta vanha laiteohjelmisto (engl. firmware), joka ei sallinut näytteistystaajuuden muuttamista. Ohjelmisto päivitettiin vaihtamalla laitteen sisällä oleva muistikortti maahantuojaan toimittamaan muistikorttiin, joka sisälsi uuden laiteohjelmiston. Uusi laiteohjelmisto salli näytteistystaajuuden muuttamisen komentoportin kautta komennolla `set phaserate <luku>`, jossa `<luku>` on 1, 10, 100 tai 1000. Näytteistystaajuus asetettiin yhteen hertsiin komennolla `set phaserate 1`.

Mittausohjelma toimii siten, että 1 PPS lukitun 8040C-käyttönormaalin 10 MHz ulostulo kytketään 5115A:n reference-liittimeen, testattava laite input-liittimeen ja painetaan 5115A:n start-näppäintä. 5115A siirtyy mittaustilaan noin minuutin kuluttua start-näppäimen painalluksesta ja laitteen näytön alareunaan ilmestyy ”Collecting”-teksti. Mittausohjelman käyttöliittymästä valitaan 5115A:n IP-osoite ja asetetaan testilaitteen nimellistaajuus f_0 . Ohjelman käyttöliittymästä painetaan

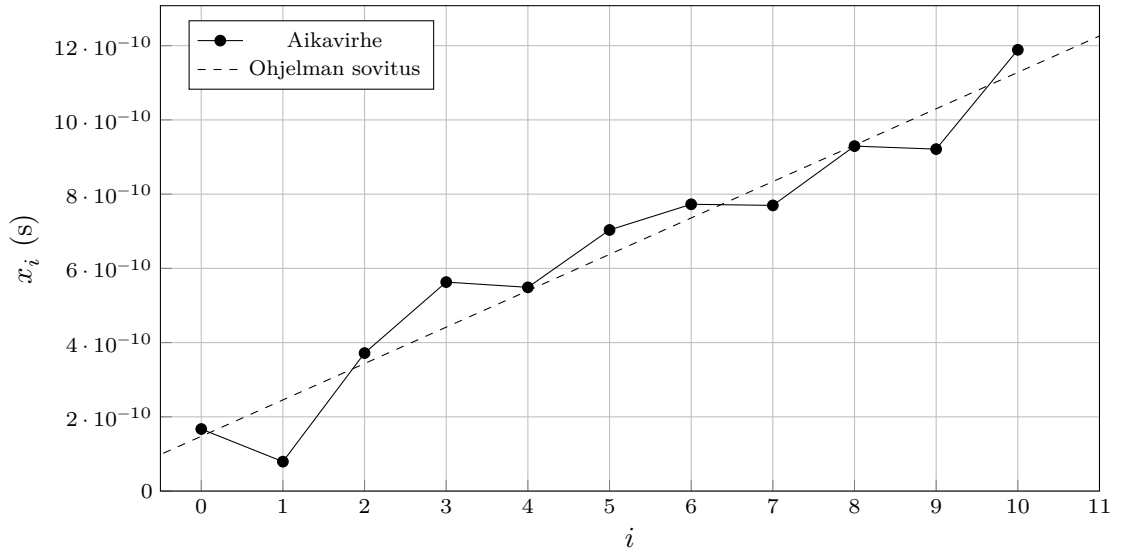
start-näppäintä, jolloin ohjelma avaa telnet-yhteyden data-porttiin.

Ohjelma lukee data-portin tietoa rivi kerrallaan, muuttaa jokaiselta riviltä luetun merkkijonon numeroksi ja muuttaa numeron aikavirheeksi x_i yhtälön

$$x_i = \frac{\psi_i}{f_0} \quad (23)$$

mukaan, jossa ψ_i on vaihe-ero DUT:n jaksoina ja f_0 on DUT:n nimellistaajuus. Ohjelma tallentaa x_i :n arvot taulukkoon, piirtää reaaliajassa kuvaajaa taulukon arvoista ja laskee pienimmän neliösumman menetelmällä lineaarisen sovituksen x_i :n arvoille.

Lineaarisen sovituksen laskemiseen käytettiin Linear Fit.vi -elementtiä, jonka slope-ulostulo on sovituksen kulmakerroin. Ohjelma ilmoittaa näytöllä kulmakerroin, joka on DUT:n suhteellisen taajuuspoikkeaman estimaatti. Kulmakerrointa voidaan käyttää suoraan suhteellisen taajuuspoikkeaman estimaattina, koska `phaserate` on 1, eli näytteistystaajuus on 1 Hz eikä kuvaajan x-akselin arvoja tarvitse skaalata. Ohjelman piirtämä kuvaaja ja sovitus on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24: Havainnekuva mittausohjelman piirtämästä kuvaajasta. Sovituksen kulmakerroin on DUT:n suhteellinen taajuuspoikkeama 8040C-referenssistä.

Ohjelman toiminta on sovellus luvun 4.1 yhtälöstä (6), jossa testattavan oskillaattorin vaiheen siirtymän aiheuttaman ajan muutoksen ja siirtymään kuluneen ajan perusteella saadaan oskillaattorin suhteellinen taajuuspoikkeama. Mittausohjelma toimii kaikissa laboratorion sisäverkon tietokoneissa, joihin on asennettu Labview Run-Time Engine 2012, joka on ladattavissa ilmaiseksi NI:n verkkosivulta.

7.4 Symmetricom 5115A:han liittyvät ongelmat

Pistetaajuuksien mittausohjelman testauksen aikana kävi ilmi, että mittausohjelman tulos ei vastannut muilla menetelmillä saatua oskillaattorin taajuuspoikkeamaa. Ongelmaa tutkittiin mittaamalla HP 53132A -laskimen sisäisen oskillaattorin taajuuspoikkeamaa Datum ExacTimella, XLi:llä, vanhalla pistetaajuuksien mittausmenetelmällä, 5115A:lla ja pistetaajuuksien mittausohjelmalla.

Datum ExacTimessä ja XLi:ssä on ominaisuus, jolla pystytään mittaamaan laitteen taajuuspoikkeama. DUT kytketään taajuusnormaalin testiporttiin ja tulos luetaan XLi:n tai ExacTimen pieneltä numeronäytöltä. ExacTimen ja XLi:n tulokset HP 53132A:n taajuuspoikkeamaksi olivat yhteneviä ja ne vastasivat vanhan järjestelmän piirturin neljän tunnin mittauksen tulosta. Tulokset kuitenkin poikkesivat työn aikana ohjelmoidun mittausohjelman tuloksista.

Ongelmaa mutkisti lisää 5115A:n ristiriitainen käyttäytyminen. Kappaleessa 7.1 todettiin, että laitteessa on taajuuslaskin- ja vaihe-ero-ominaisuus. Taajuuslaskin-ominaisuus antoi tuloksen, joka oli sama kuin ExacTimella, XLi:llä ja vanhalla piirturilla. Vaihe-ero-ominaisuus kuitenkin antoi tästä poikkeavan tuloksen. Toisin sanoen 5115A näytti toimivan samanaikaisesti oikein sekä virheellisesti. Laitteiden tulosten johdonmukaisuus on tiivistetty taulukkoon 3.

Taulukko 3: Mittausmenetelmien tulosten johdonmukaisuus. Taulukon neljä ylintä mittausmenetelmää antoivat HP 53132A:n taajuuspoikkeamaksi yhteneviä tuloksia. Kaksi alinta mittausmenetelmää poikkesivat muiden menetelmien tuloksista ja antoivat myös keskenään ristiriitaisia tuloksia.

Mittausmenetelmä	Johdonmukainen tulos?
XLi GPS #1	✓
XLi GPS #2	✓
Datum ExacTime 9390-6000	✓
Vanha piirturi ja vaihevertaaja	✓
5115A:n taajuuslaskinominaisuus	✓
5115A:n vaihe-ero-ominaisuus	✗
Pistetaajuuksien mittausohjelma	✗

Testattava laite vaihdettiin ja joissakin mittauksissa käytettiin BNC T-liitintä, jolloin testilaitteen signaali saatiin useampaan mittalaitteeseen samanaikaisesti. T-liittimen käyttö puolitti testilaitteen signaalin tehon, mutta se ei vaikuttanut tuloksiin. Kaikilla laitteiden permutaatioilla tulokset olivat taulukon 3 mukaisia.

5115A:lle päätettiin tehdä verifikaatiotesti, jonka perusteella voitaisiin päätellä, toimiko laite suunnitellusti ja spesifikaatioiden mukaisesti. Verifikaatiotesti suoritettiin ohjeen [34] mukaan. Testin suorittaminen kesti kaksi päivää. Ensimmäisenä

päivänä ohjeen vaatimat laitteet ja liittimet kerättiin sekä kalibroitiin. Toisena päivänä suoritettiin varsinainen testi. Testauspöytäkirja on esitetty liitteessä C.

Laite läpäisi verifikaatiotestin muutoin, paitsi testin 3 osalta, joka koski laitteen sisäisen oskillaattorin taajuuden ja oskillaattorin säätöalueen tutkimista [34, s. 10]. Oskillaattorin säätöalue (engl. delta frequency) todettiin liian kapeaksi, eikä ylimmän taajuuden (engl. high frequency) rajan minimivaatimus täyttynyt. Näiden ongelmien lisäksi sisäinen oskillaattori käyttäytyi testin kuvauksen vastaisesti.

Verifikaatiotestin kuvauksen mukaan 5115A:n sisäisen oskillaattorin pitää olla alimmalla taajuudella (engl. low frequency), kun laite on päällä, mutta mittaus ei ole käynnissä. Kun mittaus käynnistetään start-näppäintä painamalla, taajuuden pitäisi siirtyä ja pysyä oskillaattorin ylimmällä taajuudella. [34, s. 11] Testin aikana huomattiin, että start-näppäimen painalluksen jälkeen taajuus siirtyi ylimmälle tasolle muutamaksi sekunniksi, kunnes se palasi takaisin alimmalle tasolle.

5115A tarvitsee sisäistä oskillaattoria näytteistämään referenssi- ja DUT-laitteen signaaleja sekä näytteistettyjen signaalien kvadratuuristaamplitudidemodulaatiota varten. Referenssi- ja DUT-laitteen signaalien vaiheet lasketaan demoduloidusta signaalista, ja vaiheiden erotus on laitteiden vaihe-ero. [32, s. 88] Viallinen tai huonosti toimiva sisäinen oskillaattori todennäköisesti aiheuttaa sen, että 5115A:n vaihe-erominaisuus ja pistetaajuuksien mittausohjelman vaihe-erotiedon perusteella laskema taajuuspoikkeama eivät vastaa muilla laitteilla saatuja tuloksia. Taajuuslaskinominaisuuden oikea tulos selittyy sillä, että ominaisuus on toteutettu erillisesti. [32, s. 49]

Verifikaatiotestin tulokset skannattiin ja lähetettiin 5115A:n maahantuojoille. Maahantuoja välitti tiedon edelleen laitteen valmistajalle Yhdysvaltoihin.

8 Uuden järjestelmän arviointi

Laboratorio ei voi huoltaa 5115A:ta, vaan väärin toimiva laite pitää lähettää aina valmistajalle tutkittavaksi. Verifikaatiotesti toimitettiin maahantuojaan kautta valmistajalle vuoden 2013 heinäkuun alussa, mutta tuloksiin ei saatu elokuun loppuun mennessä vastausta, eikä laitetta voitu lähettää tämän työn aikana huoltoon. Heinäkuun alun ja elokuun lopun välisenä aikana perehdyttiin taajuusnormaalien toimintaan tarkemmin ja valmisteltiin menetelmiä, jolla uutta järjestelmää voitaisiin arvioida. Tässä luvussa esitellään uuden järjestelmän suorituskyvyn arvioimiseen käytettäviä menetelmiä ja niiden tuloksia.

Koko työn ajan 5115A:lla saadut taajuusnormaalien Allan-deviaation tulokset vastasivat testattavien laitteiden spesifikaatioita. Tarkka menetelmä, jolla laite mitta-Allan-deviaation jäi epäselväksi. On kuitenkin melko todennäköistä, että Allan-deviaatio lasketaan laitteen mittaaman vaihetiedon perusteella, johon laite käyttää sisäistä oskillaattoriaan. Tästä syystä tulee muistaa, että vaikka Allan-deviaation tulokset olivat järkeviä, on tämän työn kaikki ADEV-tulokset saatu laitteella, joka ei läpäissyt verifikaatiotestiä.

8.1 8040C-käyttönormaalin suorituskyyky

Oskillaattorin tarkkuuden ja stabiilisuuden määrittäminen tapahtuu vertaamalla tutkittavaa oskillaattoria johonkin referenssiin. Kaikissa oskillaattoreissa on kohinaa, eikä täysin häiriötöntä ideaalioskillaattoria ole olemassa. Tarkkuus ja stabiilisuus ovat siis aina tutkittavan oskillaattorin ja referenssioskillaattorin epäideaalisuuksien yhdistelmiä.

Yleensä tarkoituksena on minimoida referenssilaitteen vaikutus mittaukseen, esimerkiksi huolehtimalla, että referenssilaitte on yhden tai useampia dekadeja tarkempi kuin tutkittava laite [19, s. 92]. Laboratorion uuden 8040C-käyttönormaalin suorituskyvyn määrittäminen oli haastavaa, sillä tarkoituksena oli ottaa käyttönormaaliksi laite, jonka tarkkuus ja stabiilisuus oli kaikista laboratorion laitteista paras. Toisin sanoen laboratoriolle ei ollut tarkkaa referenssilaitetta, johon uutta käyttönormaalia olisi voinut verrata.

Itse laitteen suorituskyvyn lisäksi arvioinnissa täytyy huomioida jäljitettävyyshetken kaikkien linkkien vaikutus laitteen toimintaan. Jäljitettävyyshetken linkit on esitetty taulukossa 4. A ja B linkkien vaikutus laboratorion käyttönormaalilla tehtäviin mittauksiin on käytännössä olematon, mutta jäljitettävyyden ja suorituskyvyn toteamiseksi ne on dokumentoitava [16].

Linkin A vaikutusta arvioitiin BIPM:n julkaiseman UTC-UTC(USNO)-mittaus-tiedon perusteella. Mittaustieto ladattiin BIPM:n verkkosivulta, tallennettiin tietokoneelle ja analysoitiin käyttäen Matlab-ohjelmaa [35]. Analyysistä kävi ilmi, että

Taulukko 4: Jäljitettävyyssketjun linkit. Taulukko mukautettu lähteestä [16].

Linkki	Referenssi	Verrataan
A	UTC	UTC(USNO)
B	UTC(USNO)	GPS-aikaisignaali
C	GPS-aikaisignaali	XLi GPS #1
D	XLi GPS #1	8040C

viimeisen 14 vuoden aikana UTC(USNO):n suhteellinen taajuuspoikkeama UTC:stä oli keskimäärin $-9,1 \cdot 10^{-18}$ ja sen keskihajonta $3,3 \cdot 10^{-15}$.

Linkin B vaikutusta arvioitiin linkin A tapaan, mutta mittaustietona käytettiin USNO:n julkaiseman 180 päivän UTC(USNO)–GPS-dataa [36]. Suhteellinen taajuuspoikkeama oli keskimäärin $1,9 \cdot 10^{-14}$ ja sen keskihajonta $3,3 \cdot 10^{-14}$. Linkkien A ja B analyysissä käytetyt Matlab-komentosarjat on esitetty liitteessä D.

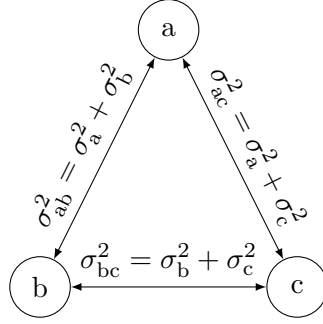
Linkin C vaikutusta arvioitiin järjestelmän rakenteen ja XLi:n spesifikaation mukaan. GPS-signaalin vastaanottamiseen käytetty antennin sijoitus täytti ohjeen [30, s. 17] vaatimukset. Lisäksi signaalinjakaja ja johdot olivat spesifikaation mukaisia. XLi GPS #1 oli sijoitettu kalibrointilaboratorioon, jonka olosuhteita seurattiin jatkuvasti. Laitteen ylä- ja alapuolella oli riittävästi tilaa, jotta ilma pääsi vaihtumaan eikä laitteen sisäinen oskillaattori päässyt kuumenemaan liikaa. Hyvin sijoitetun ja oikein toimivan GPSDO-laitteen 1 PPS ulostulon suhteellinen epävarmuus voi olla jopa $< 2 \cdot 10^{-13}$ ($k = 2$) [16]. Arvioinnissa päädyttiin käyttämään kuitenkin XLi:n spesifikaation suhteellista epävarmuutta $1 \cdot 10^{-12}$ ($k = 2$).

Linkin D vaikutusta arvioitiin spesifikaatioiden ja mittausten perusteella. Kun 1 PPS signaali kytketään 8040C:hen, alkaa laite arvioimaan lukitussignaalin laatua vertaamalla sitä omaan sisäiseen rubidiumoskillaattoriinsa. GPS:n tarjoama 1 PPS signaali ei ole lyhyellä aikavälillä tarkka. Esimerkiksi XLi:n 1 PPS ulostulon vaihtelun tehollisarvo on 30 ns, joka vastaa $3 \cdot 10^{-8}$ suhteellista epävarmuutta. Pitkällä aikavälillä vaihtelun keskiarvo on lähellä nollaa ja sen avulla voidaan ohjata toista oskillaattoria. Kun XLi on ollut lukittuna GPS-signaaliin 24 tuntia ja laite toimii oikein, lukittuu 8040C XLi:n 1 PPS signaaliin alle viidessä minuutissa ja saavuttaa spesifikaation mukaisen suorituskyvyn 20 minuutin päästä lukituksesta. Tällöin 8040C:n taajuuden suhteellinen epävarmuus on $1 \cdot 10^{-12}$ ($k = 2$).

8040C:n stabiilisuutta mitattiin kolmionhattumenetelmällä (engl. three-cornered hat, TCH). TCH-menetelmässä kolmea oskillaattoria verrataan pareittain keskenään ja käytetään hyödyksi tietoa, että epästabiilisuus on aina oskillaattorien epäideaalisuuksien summa. Kolmionhattumenetelmä on havainnollistettu kuvassa 25.²

Kolmesta mittausparista saadaan muodostettua kolme Allan-varianssin yhtälöä

²Allan-varianssia merkitään σ_y^2 , mutta selkeyden vuoksi tässä yhteydessä ala indeksi y :n tilalla käytetään oskillaattorien tunnuksia a, b ja c.



Kuva 25: Kolmiohattumenetelmän toimintaperiaate. Oskillaattoreista a, b ja c muodostuu kolme mittausparia. Jokaisen mittauksen tulos on aina molempien oskillaattorien epästabiilisuuksien summa.

$$\sigma_{ab}^2 = \sigma_a^2 + \sigma_b^2 \quad (24)$$

$$\sigma_{ac}^2 = \sigma_a^2 + \sigma_c^2 \quad (25)$$

$$\sigma_{bc}^2 = \sigma_b^2 + \sigma_c^2 \quad (26)$$

ja yhtälöryhmästä ratkaistaan a:n Allan-varianssi sijoittamalla yhtälöt (25) ja (26) yhtälöön (24)

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{ab}^2 + \sigma_{ac}^2 - \sigma_{bc}^2) \quad (27)$$

ja Allan-deviaatio

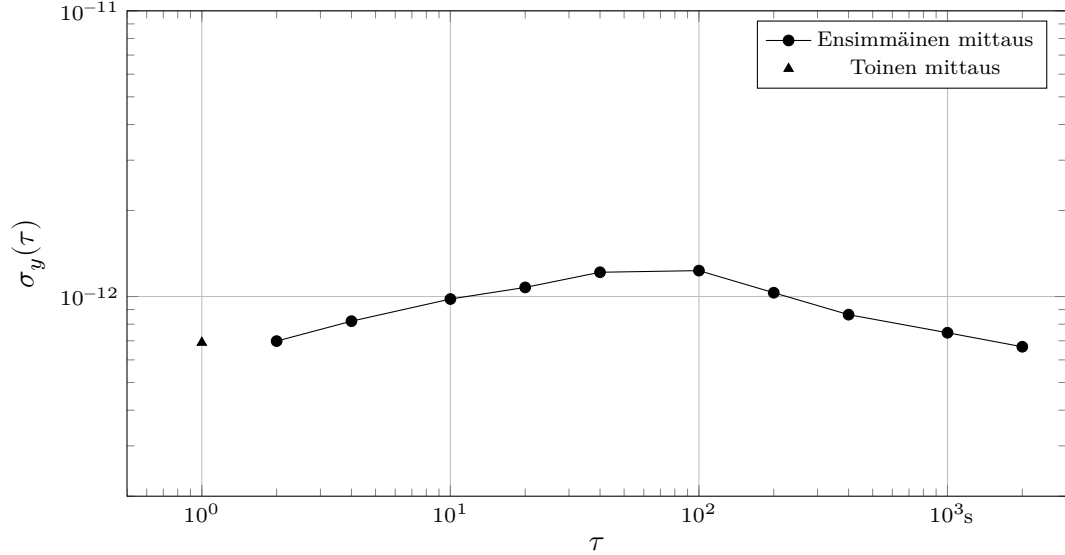
$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{ab}^2 + \sigma_{ac}^2 - \sigma_{bc}^2)}. \quad (28)$$

TCH-mittauksissa käytettiin kolmea oskillaattoria. XLi:hin lukittua 8040C:tä, Datum ExacTimeä ja Rohde & Schwarzia. Ennen mittauksia ExacTime otettiin pois GPS-lukituksesta. Näin vältettiin tilanne, jossa 8040C ja ExacTime olisivat ohjautuneet saman GPS-signaalin perusteella ja joka olisi voinut aiheuttaa korrelaatiota laitteiden ulostuloissa. Vertailumittaukset suoritettiin 5115A:lla ($\tau_0 = 1$ s) käyttäen oskillaattorien 10 MHz ulostuloja. Kaikkien kolmen mittauksen kesto oli noin 16 tuntia.

Mittausten perusteella ei saatu 8040C:n stabiilisuudelle arvoa, kun $\tau = 1$ s, koska yhtälön (27) tulos oli tällöin negatiivinen. Tulos johtui todennäköisesti siitä, että kolmiohattumittaus toimii parhaiten, kun tarkoituksena on tutkia kolmea lähes yhtä stabiilia oskillaattoria. Tilanteessa, jossa jokin oskillaattoreista on selvästi muita stabiilimpi, voi parhaimman oskillaattorin vaiheen vaihtelu kadota muiden oskillaattorien vaiheiden vaihteluun. Seurauksena voi olla negatiivisia Allan-varianssin arvoja, jotka eivät ole todellisuudessa mahdollisia eikä Allan-deviaatiolle silloin saa-

da tulosta. [19, s. 93]

Toinen lyhyempi mittaus suoritettiin käyttäen samoja laitteita, jolloin 8040C:n stabiilisuudelle saatiin arvo, kun $\tau = 1$ s. Mittausten yhdistetty tulos on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26: 8040C:n stabiilisuus, kun laite on lukittu XLi GPS #1:n GPS-lukittuun 1 PPS ulostuloon.

Kolmiohattumenetelmän luottamusväliä ei voida arvioida suoraan liitteen A taulukon 9 vapausasteiden ja yhtälön (21) avulla. Kohinatyyppien vapausasteiden tulos pitää kertoa suhdeluvulla

$$\Gamma_i = \frac{2\sigma_i^4}{2\sigma_i^4 + \sigma_a^2\sigma_b^2 + \sigma_a^2\sigma_c^2 + \sigma_b^2\sigma_c^2} \quad (29)$$

jossa i on a, b tai c. Vapausasteiden määrä kerrotaan suhdeluvulla, koska kolmiohattumenetelmässä vapausasteita on vähemmän kuin tilanteessa, jossa referenssinä on yksi testilaitetta selvästi parempi oskillaattori. [37]

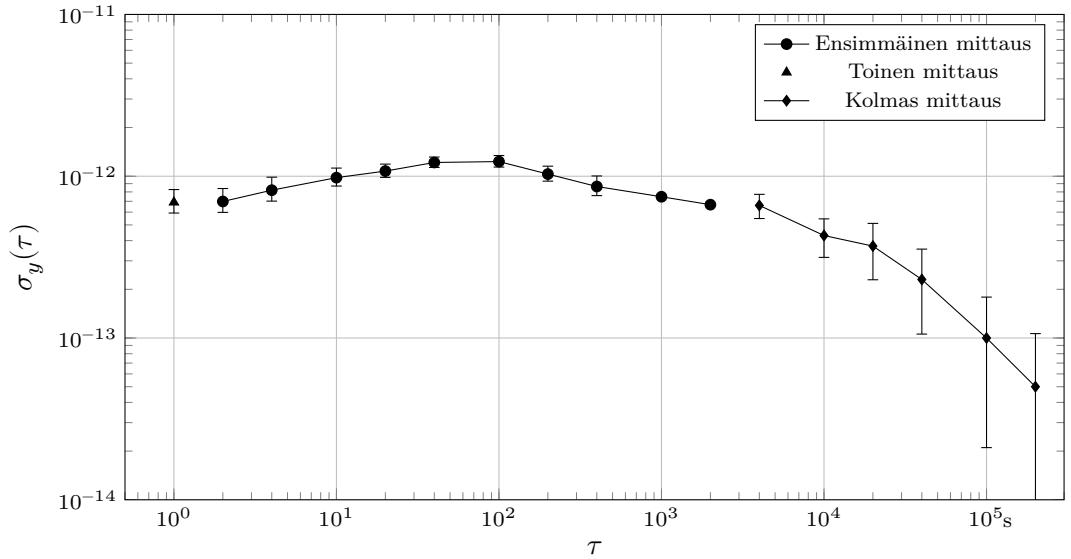
R&S XSRM:n ja ExacTimen Allan-varianssit ratkaistiin mittaustuloksista ja laskettiin suhdeluku Γ . R&S XSRM -laitteen AVAR oli negatiivinen, kun $\tau = 1000$ s ja $\tau = 2000$ s, eikä luottamusväliä voitu laskea näille arvoille. Kolmiohattumenetelmä vaatii toimiakseen erittäin pitkiä mittausjaksoja, kun menetelmällä tutkitaan laitteiden stabiilisuutta suurilla τ :n arvoilla. Mitä suuremmaksi τ :n arvo kasvaa, sitä todennäköisempää on, että mittauksissa käytettäville oskillaattoreille saadaan negatiivisia AVAR:n arvoja. [19, s. 93]

XLi GPS #1 -laitteeseen lukitun 8040C:n käyttäytymistä, kun $\tau > 2000$ s, tutkittiin tekemällä kolmas mittaus, jossa GPS-lukitun XLi GPS #2:n 10 MHz ulostulo oli referenssinä. Koska käyttönormaali ja referenssi olivat molemmat lukittuina GPS-aikasignaaliin, saattoivat signaalit korreloida keskenään. Tämä oli todennäköi-

sesti kuitenkin vähäistä, sillä GPS-aikaisignaali otettiin vastaan kahdessa eri GPS-vastaanottimessa ja kaksi erillistä ja eri mallista rubidiumoskillaattoria käyttivät signaalia ulostulojen ohjaukseen. Lisäksi kolmannen mittauksen tarkoituksena ei ollut tutkia tarkasti 8040C:n stabiilisuutta suurilla τ :n arvoilla, vaan todentaa, että GPS-ohjaus toimii suunnitellusti ja stabiilisuus paranee τ :n kasvaessa.

Kolmas mittaus kesti 6 päivää ja sen toteuttaminen kolmihattumenetelmällä ei olisi ollut ajan puutteen vuoksi mahdollista. Kolmihattumenetelmässä myös muut laitteet 8040C:n ohella olisi pitänyt lukita GPS-signaaliin ja positiivisten AVAR-tulosten saamiseksi mittausten yhteiskeston olisi pitänyt olla reilusti enemmän kuin 18 päivää. Kolmannen mittauksen tulosten 95 % luottamusväli on saatu kertomalla 5115A:n ilmoittamat luottamusvälit kattavuuskertoimella 1,96.

Kaikkien kolmen mittauksen yhdistetyt tulokset 95 %:n luottamusväleillä on esitetty kuvassa 27. Kuvasta näkyy, että GPS-lukitun käyttönormaanin stabiilisuus on parempi kuin $2 \cdot 10^{-12}$ aina $\tau = 200\,000$ s asti. On myös perusteltua olettaa, että oikein toimivan GPS-lukitun käyttönormaanin ADEV on $< 2 \cdot 10^{-12}$ suuremmilla τ :n arvoilla.



Kuva 27: XLi GPS #1:n 1 PPS ulostuloon lukitun 8040C:n stabiilisuus 95 % luottamusvälillä.

Linkkien A–D epävarmuustekijöiden ja stabiilisuusmittausten perusteella GPS-lukitun käyttönormaanin 10 MHz ulostulo f_{out} on

$$f_{\text{out}} = f_0(1 + \delta f) + f_A + f_B + f_C \quad (30)$$

jossa f_0 on ulostulon nimellistaajuus, f_A linkin A aiheuttama epävarmuus, f_B linkin B aiheuttama epävarmuus, f_C linkin C aiheuttama epävarmuus ja δf on GPS-lukitun 8040C:n stabiilisuus. Käyttönormaanin 10 MHz ulostulon epävarmuusbud-

jetti on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: GPS-lukitun 8040C:n 10 MHz ulostulon epävarmuusbudjetti.

suure	estimaatti ³	standardi- epävarmuus	todennä- köisyys- jakauma	herkkyyss- kerroin	epävarmuus- osuus
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
f_0	$10 \cdot 10^6 \text{ Hz}$	$5 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$	normaali	1,0	$5 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$
f_A	$-9,1 \cdot 10^{-11} \text{ Hz}$	$3,3 \cdot 10^{-8} \text{ Hz}$	normaali	1,0	$3,3 \cdot 10^{-8} \text{ Hz}$
f_B	$1,9 \cdot 10^{-7} \text{ Hz}$	$3,3 \cdot 10^{-7} \text{ Hz}$	normaali	1,0	$3,3 \cdot 10^{-7} \text{ Hz}$
f_C	$0,0 \text{ Hz}$	$5 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$	normaali	1,0	$5 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$
δf	$0,0 \text{ Hz}$	$2 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$	normaali	1,0	$2 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$
f_{out}	$10 \cdot 10^6 \text{ Hz}$				$2,1 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$

Taulukosta näkyy, että ulostulon standardiepävarmuus johtuu lähes yksinomaan käyttönormaanin epästabiilisuudesta. Linkkien A ja B estimaatit ovat häviävän pieniä suhteessa ulostulon standardiepävarmuuteen. Lisäksi itse linkkien standardiepävarmuus on moninkertainen suhteessa linkkien estimaattiin. Voidaan perustellusti olettaa, että UTC–UTC(USNO):n ja UTC(USNO)–GPS:n keskiarvo ja siten linkkien A sekä B estimaatit ovat riittävän lähellä nollaa, jotta niiden vaikutus ulostulon estimaattiin voidaan jättää huomioimatta. Jos linkkien estimaatin vaikutus halutaan kuitenkin huomioida jonakin tiettyä ajankohtana täytyy UTC–UTC(USNO) ja UTC(USNO)–GPS tiedot ladata edellä mainituista lähteistä ja laskea suhteellisen taajuuspoikkeaman keskiarvo esimerkiksi viimeisen kymmenen päivän ajalta.

Käyttönormaanin laajennettu epävarmuus kattavuuskertoimella 2 on

$$U = k \cdot u(f_0) = 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ Hz} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}.$$

ja uuden käyttönormaanin 10 MHz ulostulo on

$$(10\,000\,000 \pm 0,000\,042) \text{ Hz}$$

kun käyttönormaali on ollut lukittuna vähintään 20 minuuttia 24 tuntia GPS-lukittuna olleen XLi GPS #1 referenssinormaanin 1 PPS ulostuloon. Käyttönormaanin suhteellinen epävarmuus u_{kn} on

$$u_{\text{kn}} = \frac{2,1 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}}{10 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 2,1 \cdot 10^{-12}$$

ja laajennettu suhteellinen epävarmuus $U_{\text{kn}} = 4,2 \cdot 10^{-12}$ ($k = 2$).

³Estimaatista käytetään yleisesti tunnusta x_i , jota ei pidä sekoittaa myös yleisesti käytettyyn aikavirheen tunnukseen x_i .

8.2 Taajuuksien 10 Hz ... 26 GHz ja aikavälin mittaust

Taajuuksien 10 Hz ... 26 GHz mittausten epävarmuuslaskelmat on jaettu kolmeen eri taajuusalueeseen. Taajuusalueen 10 Hz ... 500 MHz laskelmissa epävarmuutena on käytetty R&S XSRM:n suhteellista epävarmuutta $3 \cdot 10^{-11}$. Taajuusalueiden 500 MHz ... 5 GHz ja 5 GHz ... 26 GHz epävarmuuslaskelmissa epävarmuutena on käytetty arvoa $4 \cdot 10^{-11}$, jota tulee käyttää, kun laskimeen kytketyn referenssin epävarmuus on tätä arvoa pienempi. Aikavälimittausten epävarmuuslaskelmissa on käytetty R&S XSRM:n epävarmuutta $3 \cdot 10^{-11}$ koko alueelle 10 ns ... 10 s.

Taajuslaskimien mittausten osalta riittää, kun uuden käyttönormaanin suhteellinen epävarmuus on $< 3 \cdot 10^{-11}$ ($k = 2$). Luvussa 8.1 todettiin, että $U_{\text{kn}} = 4,2 \cdot 10^{-12}$, mikä tarkoittaa, että akkreditoitu mittaustyky säilyy.

8.3 Pistetaajuuksien mittaushjelman epävarmuus

Testattavan laitteen suhteellinen taajuuspoikkeama on pistetaajuuksien mittaushjelman laskeman lineaarisen sovituksen kulmakerroin. Ohjelma laskee lineaarisen sovituksen 5115A:n mittaamasta vaihe-erotiedosta, jonka referenssinä käyttönormaali toimii. Pistetaajuuden mittaushjelman epävarmuuteen vaikuttaa 8040C-käyttönormaanin epävarmuus, 5115A:n pohjakohina (engl. noise floor) ja lineaarisen sovituksen kulmakertoimen keskihajonta.

Mittaustulokseen summautuvaa vaihekohinaa, joka aiheutuu mittalaitteesta kutsutaan pohjakohinaksi. 5115A:n aiheuttaman vaihe-erotietoon summautuvan vaihekohinan kohinakaistanleveys (engl. noise equivalent bandwidth, NEQBW) on 0,5 Hz, kun `phaserate` on 1. NEQBW tarkoittaa, että mitattuun signaaliin voidaan mittalaitteen epäideaalisuuksien takia ajatella summautuvan 0,5 Hz etäisyydellä signaalin nimellistaajuudesta epätoivottua vaihekohinaa $\mathcal{L}(f)$. 5115A:n spesifikaation mukaan pohjakohina on suurimmillaan 1 Hz etäisyydelle asti -131 dBc/Hz, kun input-liittimeen on kytketty 1 MHz signaali. [32, s. 82] 8040C:n 10 MHz ulostulon vaihekohina 1 Hz etäisyydelle asti on -100 dBc/Hz [38]. Laitteiden pohjakohinat ovat

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{5115} &= 10^{-13,1} \cdot P_c \frac{\text{rad}^2}{\text{Hz}} \\ \mathcal{L}_{8040} &= 10^{-10} \cdot P_c \frac{\text{rad}^2}{\text{Hz}}\end{aligned}$$

jossa P_c on kantoaallon tehotiheys. Laitteiden yhdistetty pohjakohina \mathcal{L}_{yhd} 1 Hz kaistanleveydellä suhteessa kantoaaltoon on

$$\mathcal{L}_{\text{yhd}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{(10^{-13,1} + 10^{-10}) P_c \frac{\text{rad}^2}{\text{Hz}}}{P_c \frac{\text{rad}^2}{\text{Hz}}} \right) = -99,997 \text{ dB}.$$

Yksiköillä dBc/Hz ilmaistuna $\mathcal{L}_{\text{yhd}} = -99,997 \text{ dBc/Hz}$. Vaihe-erotietoon summautuu ei-toivottua vaihekohinaa, joka johtuu vain käyttönormaalista, koska yhdistetty vaihekohina \mathcal{L}_{yhd} on käytännössä yhtä suuri kuin 8040C:n vaihekohina. Käyttönormaalin taajuuspoikkeamaa ja vaihekohinan vaikutusta arvioitiin jo luvussa 8.1 Allan-deviaation sekä jäljitettävyyssketjun linkkien perusteella. Käyttönormaalin suhteelliseksi epävarmuudeksi u_{kn} saatiin $2,1 \cdot 10^{-12}$.

Käyttönormaalin epävarmuus summautuu mittausohjelman lineaarisen sovituksen kulmakertoimen keskihajontaan. Lineaarisen sovituksen kulmakertoimen keskihajonta s_b on

$$s_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (31)$$

jossa n on näytteiden lukumäärä, x_i on näytteen i aikavirhe, \hat{x}_i on näytteen i sovituksen arvo, t_i on näytteen i mittaushetki ja \bar{t} on mittaushetkien keskiarvo [39]. Koska 5115A:n `phaserate` oli asetettu 1 näytteeseen sekunnissa, on mittaushetki $t_i = i$ ja $\bar{t} = \frac{n+1}{2}$. Yhtälö (31) saadaan muotoon

$$s_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (i - \frac{n+1}{2})^2}}. \quad (32)$$

Kun s_b ja u_{kn} yhdistetään neliöllisesti, saadaan pistetaajuuksien mittausohjelman yhdistetty suhteellinen standardiepävarmuus

$$u_{\text{ohj}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (i - \frac{n+1}{2})^2} + (2,1 \cdot 10^{-12})^2} \quad \text{kun } n \geq 3. \quad (33)$$

Yhtälöstä (33) nähdään, että s_b lähestyy nollaa ja mittausohjelman epävarmuus lähestyy käyttönormaalin epävarmuutta, kun $n \rightarrow \infty$. Mittausohjelman epävarmuuteen vaikuttaa siis käyttönormaalin lisäksi termin s_b arvo. Mittausohjelman laajennettu suhteellinen epävarmuus on $U_{\text{ohj}} = 2u_{\text{ohj}}$. $U_{\text{ohj}} < 3 \cdot 10^{-11}$, kun $u_{\text{ohj}} < 1,5 \cdot 10^{-11}$ eli

$$\begin{aligned}
u_{\text{ohj}} &< \sqrt{s_b^2 + u_{\text{kn}}^2} \\
s_b &< \sqrt{u_{\text{ohj}}^2 - u_{\text{kn}}^2} \\
s_b &< \sqrt{(1,5 \cdot 10^{-11})^2 - (2,1 \cdot 10^{-12})^2} \\
s_b &< 1,49 \cdot 10^{-11}.
\end{aligned}$$

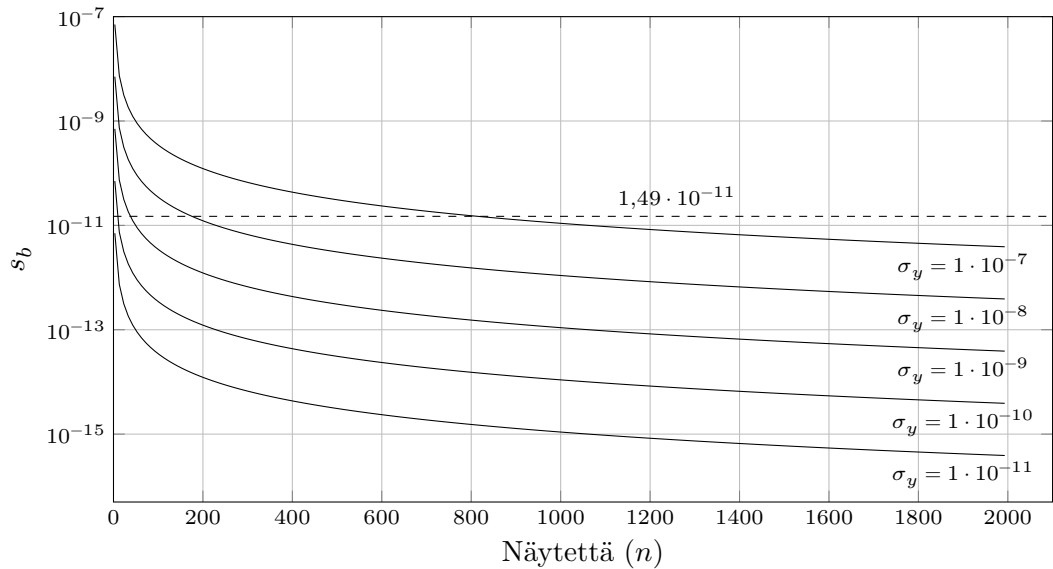
Yhtälön (32) mukaan s_b riippuu näytteiden määrästä n ja termistä $(x_i - \hat{x}_i)$, joka on mitatun aikavirheen poikkeama sovituksesta. Itseasiassa yhtälön (32) osa

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{(n-2)}}$$

on mitattujen aikavirheiden keskihajonta sovituksesta, joka riippuu DUT:n stabiilisuudesta. Termin s_b arvoa voidaan approksimoida yhtälöllä

$$s_b = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (i - \frac{n+1}{2})^2}} \quad (34)$$

jossa σ_y on DUT:n Allan-deviaatio ja n on näytteiden määrä. Termiä s_b arvioitiin viidellä eri Allan-deviaation arvolla. Arvio tehtiin Matlab-komentosarjalla, joka on liitteessä D. Arvion tulokset on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28: Pistetaajuuksien mittausohjelman mittausaika. Termin s_b pitää olla vähemmän kuin $1,49 \cdot 10^{-11}$, jotta mittausohjelmalla päästään akkreditointitodistuksen mittausepävarmuuteen. Kuvan tulos on approksimaatio mittausajasta, sillä ADEV ja aikavirheiden keskihajonta eivät ole tarkalleen samoja.

Kuvan y-akseli kuvaa s_b termin arvoa. Kuvasta nähdään, että mitä epästabiilimpi testattava laite on sitä enemmän näytteitä tarvitaan, jotta s_b :n arvo on $< 1,49 \cdot 10^{-11}$ ja päästään $< 3 \cdot 10^{-11}$ laajennettuun mittausepävarmuuteen. Esimerkiksi kun mitataan laitetta, jonka ADEV on $1 \cdot 10^{-7}$, tarvitaan vähintään 800 näytettä, eli mittausajan pitää olla pitempi kuin 800 sekuntia. ADEV $1 \cdot 10^{-6}$ (ei kuvassa) laitteen mittausajan pitää olla hieman yli tunnin, että päästää riittävän pieneen epävarmuuteen. ADEV $1 \cdot 10^{-6}$ tarkoittaa jo sitä, että esimerkiksi 10 MHz signaalin taajuuden vaihtelun tehollisarvo on 10 Hz.

Tyypillisen, kvartsikiteen värähtelyyn perustuvan rannekellon Allan-deviaatio on $< 1 \cdot 10^{-7}$ [40]. On epätodennäköistä, että laboratorion tarvitsee mitata rannekelloa epästabiilimpia laitteita. Kun testattavan laitteen stabiilisuus paranee vähenee mittaukseseen tarvittava aika eksponentiaalisesti. Tarvittavaan $< 3 \cdot 10^{-11}$ laajennettuun mittausepävarmuuteen päästään joissakin tapauksissa kymmenessä sekunnissa.

8.4 Huolto ja ylläpito

Uutta järjestelmää varten hankitut laitteet ovat pääsääntöisesti ylläpito- ja huoltovapaita. XLi, 8040C ja 5115A eivät vaadi kalibrointia, ja väärin toimiva laite lähetetään yksinkertaisesti valmistajalle tai maahantuojaalle, joka huoltaa laitteen. XLi:ssä tällainen tilanne voi tulla vastaan, kun sen sisäinen oskillaattori ikääntyy merkittävästi ja laitteen automatiikan tekemä säädön voimakkuus kasvaa liian suureksi. Vikatilanteessa XLi:n etupaneelissa oleva vihreä valo muuttuu punaiseksi. Valo voi syttyä muissakin tilanteissa, esimerkiksi jos GPS-lukitus katoaa. XLi:n tila on tarkistettavissa etupaneelistä sekä telnet-yhteyden tai verkkoselaimen kautta. Helpointa laitteen hallinta ja vikatilanteen aiheuttajan selvittäminen on verkkoselaimen avulla. [30]

8040C ei vaadi ylläpitoa. Oskillaattorin taajuutta kyllä pystyy säätämään manuaalisesti takapaneelin RS-232-portin kautta, mutta se ei ole tarpeellista, sillä oskillaattori säätää itsensä automaattisesti, kun se on 1 PPS lukittuna. [31]

5115A:lle syytä suorittaa säännöllisesti verifikaatiotesti. Verifikaatiotesti ei ole varsinainen kalibrointi, vaan laitteen suorituskykyarvojen toteaminen, minkä perusteella laitteen päätellään toimivan oikein. Mikäli laite ei läpäise verifikaatiotestiä, on otettava yhteys valmistajaan tai maahantuojaan. [32] Työn aikana laitteen firmware päivitettiin tilaamalla maahantuojaalta uusi muistikortti, joka vaihdettiin fyysisesti vanhan kortin tilalle. Firmwaren päivityksen myötä tulevien päivitysten asentaminen on helpompaa. Päivitykset voidaan tehdä lataamalla firmware valmistajan sivuilta ja siirtämällä se 5115A:han USB-portin kautta.

5115A:n ylläpitotoimet voidaan hoitaa etupaneelin näppäinten ja hiiren avulla. Ominaisuuksien asetuksia muutetaan painamalla ominaisuusvalinnan näppäintä

uudestaan. Esimerkiksi painamalla ”Allan deviation plot”-näppäintä muuttuu valikon teksti muotoon ”Config Allan deviation”, jota painamalla päästään asetuksiin. Vaihe-erotiedon näytteistystaajuus muutetaan komennolla `set phaserate <luku>` komentoyhteyden kautta. Komentoyhteys on epävakaa ja komento pitää usein toistaa kolme kertaa ennen sen toteutumista. Ohjekirjan mukaan 5115A:n pitäisi säilyttää asetukset vaikka laitteesta katkaistaisiin virta. Työn aikana huomattiin, että asetukset palautuivat kuitenkin takaisin tehdasasetuksiin, kun laite sammutettiin. Tällöin näytteistystaajuus palautuu oletukseen 1000 sekä verkko- ja tulostinasetukset nollautuvat. Näytteistystaajuus kannattaa pitää arvossa 1, jolloin NEQBW on kapein.

XLi:n ja 5115A:n takapaneeleissa on tuulettimet, joiden tukkeutuminen tai vikaantuminen voivat aiheuttaa laitteiden ylikuumenemista. K013-laboratorio on puhdas ja se siivotaan säännöllisesti, joten tuulettimien tukkeutuminen ole todennäköistä. Tuulettimet on silti hyvä aika ajoin tarkistaa.

8.5 GPS-lukittu oskillaattori taajuusnormaalina

GPS-lukittujen taajuusnormaalien käyttö kalibrintilaboratorioissa on nykyään yleistä. Laitteiden käyttöä kritisoidaan joskus siitä, ettei laitteita voida jäljittää aukottomasti kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin. Kritiikki on aiheetonta, koska laitteet pystytään jäljittämään mittanormaaleihin yksisuuntaisella (eng. one-way) tai yhtäaikaisella (engl. common-view) menetelmällä. [11]

Tämän työn luvussa 8.1 jäljitettävyyys UTC:hen todettiin yksisuuntaisella menetelmällä, jossa jäljitettävyysetjunnan kaikkien linkkien epävarmuus arvioitiin ja huomioitiin. Yksisuuntainen menetelmä on siis ajatukseltaan sama kuin se, että vapaasti värähtelevä rubidiumoskillaattori kalibroitaisiin kansallisessa metrologialaitoksessa. Tällöin jäljitettävyysetjunnan linkkinä UTC:hen toimisi kansallinen referenssinormaali, jonka epävarmuus huomioitaisiin rubidiumoskillaattorin kalibroinnissa.

Yhtäaikainen menetelmä toimii siten, että kaksi eri paikassa sijaitsevaa vastaanotinta kuuntelevat saman satelliitin aikasignaalia ja vertaavat signaalia esimerkiksi laboratorioden omiin käyttönormaaleihin. Vertailumittauksen jälkeen laboratoriot vaihtavat tuloksia keskenään ja tulosten erotus on kellojen välinen ero. Menetelmän etu on, että kahta taajuusnormaalia voidaan verrata etänä ja satelliitin kellon epävarmuus supistuu pois tulosten erotuksen laskutoimituksessa. [7, s. 398]

GPS-signaaliin lisättiin aikaisemmin tarkoituksella häiriösignaalia, joka heikensi signaalin käyttöä taajuusnormaaleissa ja jäljitettävyyttä täytyi todentaa työläämmällä yhtäaikaisella menetelmällä [7, s. 398]. Häiriösignaali poistettiin 1.5.2000. Nykyään yksisuuntainen menetelmä on varsin toimiva tapa jäljitettävyyden toteuttamiseen, jos kalibrintilaboratorion ei tarvitse mitata suhteellisia taajuuspoikkeamia, jotka ovat

$< 1 \cdot 10^{-12}$. [41] Yhtäaikaista menetelmää käytetään nykyään vielä, kun kansallisia taajuusnormaaleja verrataan toisiinsa kansallisiin taajuusnormaaleihin, joiden tuloksia BIPM:n käyttää UTC:n ja Circular-T:n laskemiseen [16].

Talukossa 6 on esitetty eri tyyppisten taajuusnormaalien tyypillisiä suorituskyky-arvoja. Taulukosta näkyy, että GPSDO-laite on suorituskyvyltään lähes yhtä hyvä kuin cesiumnormaali. GPSDO:n hinta huomioon ottaen GPSDO-laite on taulukon vaihtoehtoista paras valinta taajuusnormaaliksi.

Taulukko 6: Taulukon arvot ovat kunkin ominaisuuden vaihteluväli kyseiselle laitteelle. Esimerkiksi VCXO:n ajautuma / vuosi on $5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-9}$ välillä. Taajuuspoikkeama on suhteellinen taajuuspoikkeama UTC(NIST) normaalista. [11; 17]

Tyyppi	VCXO	Rubidium	Cesium	GPSDO
Taajuuspoikkeama	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$
	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$
Stabiilisuus (1 s)	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
	$1 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$
Stabiilisuus (1 d)	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-14}$	$8 \cdot 10^{-13}$
			$2 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$
Ajautuma (1 y)	$5 \cdot 10^{-7}$	$< 5 \cdot 10^{-10}$	ei ikäänny	ei ikäänny
	$5 \cdot 10^{-9}$			
Käyttöikä	ei määriteltä	15 vuotta	10 vuotta	15 vuotta
Hinta (USD)	1000 – 5000	2000 – 10000	30000 – 55000	3000 – 15000

GPSDO:n merkittävin haitta liittyy laitteen toimintatapaan. Koska laite korjaa sisäisen oskillaattorin ajautumaa ja kalibroitu automaattisesti, ei laite tarvitse aktiivista ylläpitoa. Tämä johtaa helposti siihen, että laitteen suorituskykyyn ja mittaustuloksiin suhtaudutaan liian hyväuskoisesti eikä vikatilanteita huomata. [11] Laboratorion henkilökunnan on hyvä muodostaa jokin käytäntö, jolla GPS-aikasignaaliin nojaavan järjestelmän toiminta tarkistetaan säännöllisesti. Hyviä tapoja ovat esimerkiksi GPS-antennin tutkiminen, XLi:n etupaneelin varoitusvalon tarkistaminen ja käyttönormaalin lukituksen toteaminen.

XLi:n kohdalla on hyvä tarkistaa, että XLi on Time Mode -tilassa.⁴ Kun laite on ollut riittävän pitkään päällä ja laitteen käyttämää antennia ei ole liikutettu, XLi siirtyy Time Mode -tilaan. Time Modessa laite on määrittänyt paikkatiedon erittäin tarkasti, ja aikatiedon laskeminen kaikista vastaanotetuista GPS-aikasignaaleista on tarkkaa. Lisäksi kannattaa tarkistaa, että TRAIM (engl. Time Receiver Autonomous Integrity Monitoring) on päällä. TRAIM pitää huolen, että aikatiedon ratkaisuun käytetään vain satelliitteja, joiden signaaleissa ei ole havaittu epävarmuutta lisääviä epäsäännöllisyyksiä.

⁴Time Mode -tilaa ei pidä sekoittaa Time Mode -toimintoon, jonka kautta valitaan XLi:n etupaneelin kellon näyttämä.

8.6 Järjestelmän toiminta ilman GPS-signaalia

GPS-signaalin kadotessa GPS-lukittujen oskillaattorien taajuus alkaa ajautua. Lukitsemattoman 8040C:n pitkäaikaisseuranta on mahdollista, mutta se on työlästä eikä kovinkaan hyödyllistä. Spesifikaatioiden mukaan 8040C:n ajautuma on $< 5 \cdot 10^{-11}/\text{kk}$ ja XLi:n $< 1 \cdot 10^{-11}/\text{kk}$. 8040C:n ajautuma on siis viisinkertainen kuin XLi:n ajautuma. On epätodennäköistä, että pitkäaikaisseurannan tuloksena kävisi ilmi, että lukitsemattoman 8040C:n ajautuma onkin lukitsemattomaa XLi:tä pienempi.

Lisäksi XLi:t on varustettu toiminnolla jonka avulla spesifikaation $1 \cdot 10^{-11}/\text{kk}$ ajautuman arviota voidaan parantaa. XLi:n sisäinen rubidiumoskillaattori ohjautuu vastaanotetun GPS-signaalin perusteella ja laitteen automatiikka kompensoi oskillaattorin ajautumaa. Laite pitää koko ajan kirjaa taajuuspoikkeamasta, ajautumasta ja säädön voimakkuudesta. Mikäli XLi lakkaa vastaanottamasta GPS-signaalia, etupaneelin vihreä valo muuttuu punaiseksi, laitteen sisäinen oskillaattori siirtyy vapaasti värähtelevään tilaan ja laite lopettaa oskillaattorin säätämisen. Tämän jälkeen XLi tekee parhaimman arvion siitä, mikä sen pitkän ajautuma on. Arvio perustuu GPS-lukituksen aikana tapahtuneen säädön voimakkuuteen ja taajuuspoikkeamaan. XLi:n arvion ajautumasta voi käydä tarkistamassa helposti verkkoselainliittymän kautta.

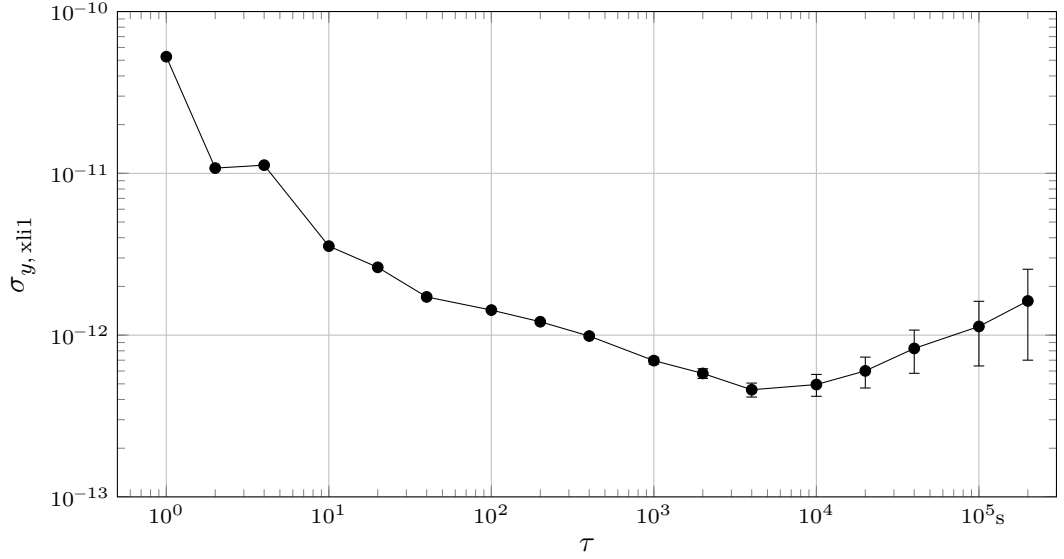
Aikaisemmin todettiin, että XLi:n lyhyen ajan stabiilisuus on huono. Jos laitteita käytetään mittauksissa taajuusnormaalina, täytyy mittausaika valita siten, että se vastaa laitteen parhainta stabiilisuuden arvoa. XLi GPS #1:n stabiilisuutta arvioitiin 5 päivää kestäneellä mittauksella. Mittaus suoritettiin siten, että molemmat XLi:t otettiin pois GPS-lukituksesta ja laitteiden 10 MHz ulostulot kytkettiin 5115A:han. Mitattu Allan-deviaatio on aina molempien laitteiden epästabiilisuuksien yhdistelmä, joten 5115A:n tulos $\sigma_{y,\text{yhd}}$ on

$$\sigma_{y,\text{yhd}} = \sqrt{\sigma_{y,\text{xli1}}^2 + \sigma_{y,\text{xli2}}^2}. \quad (35)$$

XLi:t ovat saman mallisia, yhtä vanhoja ja ne sijaitsevat fyysisesti samassa paikassa, joten voitiin perustellusti olettaa, että $\sigma_{y,\text{xli2}} = \sigma_{y,\text{xli1}}$. Sijottamalla yhtälöön (35) saadaan

$$\sigma_{y,\text{xli1}} = \frac{\sigma_{y,\text{yhd}}}{\sqrt{2}}. \quad (36)$$

Mittaustuloksesta laskettu XLi GPS #1:n Allan-deviaatio on esitetty kuvassa 29. Kuvastan näkyy, että XLi GPS #1 on stabiileimmillaan, kun $\tau = 4000$ s. Laitteen ADEV on $4,6 \cdot 10^{-13}$.



Kuva 29: Lukitsemattoman XLi GPS #1:n 10 MHz ulostulon stabiilisuus.

Taulukossa 7 on esitetty XLi:n 10 MHz ulostulon f_{out} epävarmuudesta kahden kuukauden kuluttua GPS-lukituksen katoamisesta. Esimerkkilaskelmassa ajautuman arvona on käytetty spesifikaation mukaista arvoa ja ajautuma on summattu laitteen nimellistaaajuuden standardiepävarmuuteen.

suure	estimaatti	standardi- epävarmuus	todennä- köisyys- jakauma	herkkyyss- kerroin	epävarmuus- osuus
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
f_0	$10 \cdot 10^6 \text{ Hz}$	$1,05 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$	normaali	1,0	$1,05 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$
δf	0,0 Hz	$4,6 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$	normaali	1,0	$4,6 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$
f_{out}	$10 \cdot 10^6 \text{ Hz}$				$1,05 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$

Taulukko 7: Kaksi kuukautta lukitsemattomana olleen XLi GPS #1:n 10 MHz ulostulon epävarmuusbudjetti, kun laitetta käytetään referenssinä mittauksessa, jonka mittausaika on 4000 s.

Taulukosta nähdään, että ajautuma dominoi täysin laskettua epävarmuutta. Laitteen ulostulon laajennettu suhteellinen epävarmuus on $2,1 \cdot 10^{-11}$ ($k = 2$). Tilanteissa, jossa GPS-signaalin vastaanottaminen ei ole mahdollista, kannattaa siis siirtyä käyttämään referenssinormaalia laboratorion ensisijaisena taajuusnormaalina, koska sen ajautuma on laboratorion laitteista vähäisin.

9 Johtopäätökset

Tässä työssä suunniteltiin ja rakennettiin K013-laboratorion uusi aikaväli- ja taajuusmittauslaitteisto. Laitteiston uusiminen toteutettiin kesä–elokuussa 2013. Modernisointiprojektin alussa perehdyttiin vanhaan laitteistoon ja tutkittiin laboratorion hankkimia uusia laitteita. Tarkoituksena oli korvata vanhoista laitteista käyttönormaali, referenssinormaali, vaihevertaaja ja piirturi, mutta säilyttää vanhan järjestelmän taajuuslaskimet, joita on käytetty taajuuksien 10 Hz ... 26 GHz ja aikavälin mittaamiseen.

Uusien laitteiden avulla laboratorion käyttö- ja referenssinormaali oli mahdollista yhdistää käyttämällä yhtä GPS-lukittua rubidiumoskillaattoria. Varsin nopeasti kuitenkin huomattiin, että tällainen järjestely ei takaa niin hyvää suorituskkyä kuin järjestelmä, jossa käyttönormaali ja referenssinormaali ovat erillisiä laitteita.

Piirturin ja vaihevertaajan korvaajaksi hankitun 5115A:n toiminnot todettiin kankeiksi, joten työn aikana tehtiin päätös ohjelmoida 5115A:n mittaustietoa käyttävä pistetaajuuksien mittaushjelma. Diplomityön luvussa 7.4 kävi ilmi, että 5115A toimi virheellisesti eikä laite läpäissyt verifikaatiotestiä. Lisäksi huomattiin, että 5115A ei kykene mittaamaan alle 1 MHz signaaleja, eikä se sovellu 100 kHz pistetaajuuden mittaamiseen. Iso osa projektille myönnetystä ajasta kuluikin 5115A:han tutustumiseen ja sen ongelmien ratkomiseen. Laitetta ei saatu huollettua elokuun loppuun mennessä.

Vaihe-eron lisäksi 5115A pystyy mittaamaan oskillaattorin stabiilisuutta kuvaavaa Allan-deviaatiota. Laitteella mitatut Allan-deviaation arvot vaikuttivat johdonmukaisilta ja järkeviltä, joten laitetta päätettiin käyttää uuden käyttönormaanin stabiilisuuden arviointiin. Luvussa 8.1 uuden käyttönormaanin ulostulon laajennetuksi epävarmuudeksi saatiin $4,2 \cdot 10^{-12}$ ($k = 2$). Arvioinnissa huomioitiin kaikki GPS-lukitun laitteen jäljitettävyyshetken linkkien vaikutus tulokseen.

Taajuuslaskimien mittaushjärjestelyihin ei tehty työssä suunnitelman mukaisesti mitään muutoksia. Luvussa 8.2 todettiin, että taajuuslaskimien akkreditoitu mittaushky säilyy ennallaan, kun käyttönormaanin laajennettu suhteellinen epävarmuus on $< 3 \cdot 10^{-11}$ ($k = 2$). Mittausten epävarmuuslaskelmat tulee silti päivittää, koska käyttönormaali vaihtuu.

Luvussa 8.3 arvioitiin pistetaajuuksien mittaushjelman toimintaa. Kävi ilmi, että mittaushjelman epävarmuus aiheutui käyttönormaanin vaihekohinasta ja ohjelman tekemästä lineaarisesta sovituksesta. Ohjelman mittaushaikaan taas vaikutti testattavan laitteen stabiilisuus. Mittaushajan todettiin olevan pahimmillaan 800 sekuntia. Parhaimmillaan mittaushajaksi riitti noin kymmenen sekuntia. Kun otetaan huomioon, että vanhan järjestelmän pistetaajuuksien mittaush kesti 4 tuntia, on mittaushjelma varsin nopea.

Tavoitteena oli, että mittausohjelma pystyy suorittamaan ja arkistomaan automaattisesti kaikki sillä tehdyt mittaukset. Mittausohjelma jäi pääosin keskeneräiseksi, eikä näihin tavoitteisiin päästy. Syynä oli ajan puute. Mittausohjelman epävarmuuslaskelman yhtälö jäi implementoimatta. Mittausohjelma on toimintaperiaatteeltaan kuitenkin melko yksinkertainen. Ohjelman monimutkaisin osa onkin vaihe-erotiedon merkkijonon numeroksi muuttava ja taulukkoon tallentava lohko. Uusien ominaisuuksien ja tässä työssä johdetun epävarmuuslaskelman yhtälön lisääminen ohjelmaan onnistuu kuitenkin jälkikäteen.

Kokonaisuutena työssä suunniteltu järjestelmä täytti sille asetetut tavoitteet, mutta 100 kHz pistetaajuuden mittaamiseen se ei kykene. Järjestelmän suorituskyky kaikilla muilla osa-alueilla riittää laboratorion akkreditoidun mittauskvyn säilyttämiseen. Lisäksi järjestelmän uusi käyttönormaali kalibroitu automaattisesti eivätkä luvuissa 8.5 ja 8.4 esitellyt järjestelmän ylläpitotoimenpiteet ole vaativia. 100 kHz pistetaajuuksien mittaaminen täytyy laboratoriossa toistaiseksi suorittaa vanhalla piirturilla ja vaihevertaajalla. Tällöin referenssinä voidaan käyttää uutta käyttönormaalia, eikä vanhan käyttönormalin kuukausiajojen tekemistä tarvitse jatkaa.

Tässä työssä saatuja tuloksia on toistaiseksi pidettävä suuntaa antavina. Tämä johtuu siitä, että käyttönormalin stabiilisuuden arviointi perustui 5115A:lla tehtyihin mittauksiin, vaikka 5115A ei ollut läpäissyt verifikaatiotestiä. Käyttönormalin suorituskyvyn arviointi tulee suorittaa uudelleen, kun 5115A saadaan huollettua. Stabiilisuustutkimus voidaan toteuttaa luvussa 8.1 esitetyllä kolmionhattumenetelmällä. Toinen vaihtoehto on ostaa palvelu, jossa referenssilaitteen $1\text{ s} \leq \tau \leq 10000\text{ s}$ stabiilisuus on parempi kuin $1 \cdot 10^{-12}$. Stabiilin referenssilaitteen avulla arviointi on helpompaa kuin kolmionhattumenetelmällä, eikä kohinatyypin vaikutusta tarvitse huomioida liitteen A yhtälöiden ja suhdeluvun Γ_i avulla. Lisäksi tällä tavoin epävarmuuden toteaminen voi olla selkeämpää järjestelmän teknisen arvioinnin näkökulmasta. Käyttönormalin uudelleenarvioinnin tulos pitää huomioida myös lukujen 8.2 ja 8.3 laskelmissa.

Lähteet

- [1] Young, H.D. & Freedman, R.A. "University Physics with Modern Physics". 10. painos. Addison Wesley Longman, San Francisco, 2000. 1513 s.
- [2] Zelevinsky, V. "Quantum Physics: From Basics to Symmetries and Perturbations". John Wiley & Sons, Mörlenbach, Saksa, 2011. 664 s.
- [3] SFS-EN ISO 80000–10:2013. "Quantities and units - Part 10: Atomic and nuclear physics". Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2013. 67 s.
- [4] Major, F.G. "The Quantum Beat: Principles and Applications of Atomic Clocks". 2. painos. Springer, New York, 2007. 479 s.
- [5] Waxman, A. "Coherent Manipulations of the Rubidium Atom Ground State". Pro gradu -tutkielma. Ben-Gurionin yliopisto, Israel, 2007. 87 s.
- [6] Nave, C.R. "Hyperphysics: Description of the Cesium Atom". Georgian osavaltionyliopisto. Verkkosivu. Haettu 4.11.2013 osoitteesta <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acloc.html#c4>
- [7] Riehle, F. "Frequency Standards: Basics and Applications". Wiley-VCH, Weinheim, Saksa, 2004. 526 s.
- [8] Storey, J.W.V. et al. "The 21 cm Line of Atomic Hydrogen". American Journal of Physics, 1994. Vol.62:12, s. 1077–1081.
- [9] Happer, W. "Optical Pumping". Review of Modern Physics, 1972. Vol.44:2, s. 169–249.
- [10] "The International System of Units". Bureau International des Poids et Mesures, 2006. 180 s.
- [11] Lombardi, M.A. "Selecting a Primary Frequency Standard for a Calibration Laboratory". Cal Lab Magazine: The International Journal of Metrology, huhtikuu–kesäkuu 2008, s. 33–39.
- [12] Bize, S. et al. "High-accuracy measurement of the ^{87}Rb ground-state hyperfine splitting in an atomic fountain". Europhysics Letters, 1999. Vol.45:5, s. 558–564.
- [13] "International Atomic Time". Bureau International des Poids et Mesures. Verkkosivu. Haettu 2.2.2014 osoitteesta <http://www.bipm.org/en/scientific/tai/tai.html>
- [14] "Frequently Asked Questions". Physical Measurement Laboratory, National Institute of Standards and Technology. Verkkosivu. Haettu 19.11.2013 osoitteesta <http://www.nist.gov/pml/div688/utcnist.cfm>
- [15] "NIST-F1 Cesium Fountain Atomic Clock". Physical Measurement Laboratory, National Institute of Standards and Technology. Verkkosivu. Haettu 26.11.2013 osoitteesta <http://www.nist.gov/pml/div688/grp50/primary-frequency-standards.cfm>
- [16] Lombardi, M.A. et al. "Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System". Cal Lab Magazine: The International Journal of Metrology, heinäkuu–syyskuu 2001, s. 26–33.

- [17] Lombardi, M.A. "The Use of GPS Disciplined Oscillators as Primary Frequency Standards for Calibration and Metrology Laboratories". *Measure: The Journal of Measurement Science*, 2008. Vol. 3:3, s. 56–65.
- [18] IEEE Std 1139–2008. "IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology – Random Instabilities". The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. 35 s.
- [19] Riley, W.J. "Handbook of Frequency Stability Analysis". Special Publication 1065. National Institute of Standards and Technology, 2008. 123 s.
- [20] Lance, A.L. & Seal, W.D. & Labaar, F. "Phase Noise and AM Noise Measurements in the Frequency Domain". Teoksessa: Button, K.J. (toim.) *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 11: Millimeter Components and Techniques, Part 3. Academic Press, 1984, s. 239–289.
- [21] Howe, D.A. "Frequency Domain Stability Measurements: A Tutorial Introduction". NBS Technical Note 679. National Bureau of Standards, 1976. 24 s.
- [22] SFS-IEC 60027-3. "Sähkötekniikassa käytettävät kirjaintunnukset – Osa 3: Logaritmiset suureet ja yksiköt". Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2003. 10 s.
- [23] Aumala, O. et al. "Mittaussignaalien käsittely". 3. painos. Pressus, Tampere, Suomi, 1998. 323 s.
- [24] Barnes, J.A. & Allan, D.W. "Variances Based on Data with Dead Time Between the Measurements". NIST Technical Note 1318. National Institute of Standards and Technology, 1990. 40 s.
- [25] "Characterization of Frequency and Phase Noise". Report 580. International Radio Consultative Committee, 1986, s. 142–150.
- [26] Allan, D.W. "The Allan Variance: Brief explanation". Verkkosivu. Haettu 3.7.2013 osoitteesta <http://www.allanstime.com/AllanVariance/index.html>
- [27] Rubiola, E. "Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators". Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2009. 203 s.
- [28] "LPRO Rubidium Oscillator for Time & Frequency Reference". Manuaali. Datum, 2000. 33 s.
- [29] "Akkreditointipäätös K013/A20/2013: Liite 1". FINAS, 15.4.2013. 5 s.
- [30] "XLi Time & Frequency System User Guide, Revision L". Manuaali. Symmetricom, 2010. 326 s.
- [31] "8040C/8040CLN Rubidium Frequency Standard User Guide, Revision C". Manuaali. Symmetricom, 2011. 18 s.
- [32] "5120A/5120A-01/5115A Phase Noise Test Set: Operations and Maintenance Manual, Revision M". Manuaali. Symmetricom, 2009. 100 s.
- [33] Dearing, L. "GBU Technical Support Request". Sähköpostikeskustelu. Vastanottaja: Harala, A. 2013.
- [34] "Performance Verification Procedure for Symmetricom Phase Noise Test Set, Revision D". Verifikaatio-ohje. Symmetricom, 2010. 55 s.

- [35] "FTP server of the Time Department". Bureau International des Poids et Mesures. Verkkosivu. Haettu 22.1.2014 osoitteesta <http://www.bipm.org/jsp/en/TimeFtp.jsp?TypePub=publication#nohref>
- [36] "GPS Time vs. UTC via USNO Master Clock". United States Naval Observatory. Verkkosivu. Haettu 23.1.2014 osoitteesta http://tycho.usno.navy.mil/gps_datafiles.html
- [37] Ekstrom, C.R. & Koppang, P.A. "Degrees of Freedom and Three-Cornered Hats". 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2001, s. 425–430.
- [38] "8040C Rubidium Frequency Standard". Datalehti. Symmetricom, 2011. 2 s.
- [39] "Least Squares Fitting". Wolfram MathWorld. Verkkosivu. Haettu 16.2.2014 osoitteesta <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html>
- [40] Lombardi, M.A. "The Accuracy and Stability of Quartz Watches". Horological Journal, helmikuu 2008, s. 57–59.
- [41] Lombardi, M.A. & Novick, A.N. "Comparison of the One-Way and Common-View GPS Measurement Techniques Using a Known Frequency Offset". 34rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2002, s. 39–52.

Liite A Allan-deviaation epävarmuustaulukot

Taulukko 8: Lomittamattoman Allan-deviaation kertoimen κ_α arvot 68 % luottamusvä-
lille.

Kohinatyyppi	α	κ_α
Valkoinen vaihekohina	2	0,99
Vaaleanpunainen vaihekohina	1	0,99
Valkoinen taajuuskohina	0	0,87
Vaaleanpunainen taajuuskohina	-1	0,77
Satunnaiskulkutaajuuskohina	-2	0,75

Taulukko 9: Lomitetun Allan-deviaation kohinatyyppin vapausasteet, kun N on aikavir-
hemittausten lukumäärä ja $n = \tau/\tau_0$.

Kohinatyyppi	Vapausasteet (df)
Valkoinen vaihekohina	$\frac{(N+1)(N-2n)}{2(N-n)}$
Vaaleanpunainen vaihekohina	$\sqrt{\exp \left[\ln \left(\frac{N-1}{2n} \right) \ln \left(\frac{(2n+1)(N-1)}{4} \right) \right]}$
Valkoinen taajuuskohina	$\left[\frac{3(N-1)}{2n} - \frac{2(N-2)}{N} \right] \frac{4n^2}{4n^2+5}$
Vaaleanpunainen taajuuskohina	$\frac{2(N-2)^2}{2,3N-4,9}$ kun $n = 1$
	$\frac{5N^2}{4n(N+3n)}$ kun $n \geq 2$
Satunnaiskulkutaajuuskohina	$\frac{N-2}{n} \frac{(N-1)^2 - 3n(N-1) + 4n^2}{(N-3)^2}$

Liite B Laitteiden tärkeimmät spesifikaatiot

Symmetricom XLi Time and Frequency System

Stabiilisuus:	1 s	$4 \cdot 10^{-11}$
	1000 s	$6 \cdot 10^{-12}$
	24 h	$1 \cdot 10^{-12}$
Huomioita:	Ulostulon tarkkuus GPS-lukituksessa 24 h jälkeen $1 \cdot 10^{-12}$. Laitteen 1 PPS ulostulo on ± 30 ns RMS, ± 100 ns peak UTC(USNO) ajasta. Ajautuma $< 1 \cdot 10^{-11}$ / kk.	

Symmetricom 8040C

Stabiilisuus:	1 s	$1.4 \cdot 10^{-11}$
	10 s	$8 \cdot 10^{-12}$
	100 s	$2.5 \cdot 10^{-12}$
Huomioita:	Laitteen oskillaattori on SA.22C LN (engl. low noise, LN). Laitteella päästään $1 \cdot 10^{-12}$ epävarmuuteen 1 PPS lukituksella, kun lukitus on ollut päällä 20 min. Ajautuma $< 5 \cdot 10^{-11}$ / kk kun laite on ollut päällä 30 päivää.	

Symmetricom 5115A Phase Noise Test Set

5115A:n Allan-deviaatiomittauksen epävarmuus on $< 1 \cdot 10^{-14}$ ja NEQBW 0,5 Hz kun τ_0 on 1 s. Jos input- tai reference-liittimeen kytkettyjen laitteiden signaalin amplitudi on < 8 dB (1 mW), 5115A:n aiheuttama pohjakohina kasvaa.

Taulukko 10: Taajuuslaskurin näytön tarkkuus riippuu mittausajasta ja sisäänmenosignaalin f taajuudesta.

Mittausaika (s)	$f \leq 1,99$ MHz	$f \leq 4,99$ MHz	$f > 4,99$ MHz
1 s	13	13	13
10 s	14	14	14
100 s	14	14	15
1000 s	14	14	15

60

Liite D Matlab-komentosarjat

```

1 % [UTC-UTC(USNO)]
2 fileID = fopen('utc_utc_usno.txt');
3 C = textscan(fileID,'%f %f %*[\n]', 'HeaderLines',2, 'MultipleDelimsAsOne',1);
4 fclose(fileID);
5
6 A = cell2mat(C);
7
8 days_in_seconds = diff(A(:,1))*24*60*60;
9 change_in_seconds = diff(A(:,2))*1e-9;
10
11 frequency = -1*change_in_seconds./days_in_seconds;
12
13 plot(A(2:end,1),frequency)
14 mean_freq = mean(frequency)
15 stdev_freq = std(frequency)

```

Komentosarja 1: Jäljitettävyysslinkki A:n tiedon analysointiin käytetty Matlab-komentosarja.

```

1 % [UTC(USNO)-GPS]
2 fileID = fopen('utc_usno_gps.txt');
3 C = textscan(fileID,'%f %f %f %*[\n]','HeaderLines',5,'MultipleDelimsAsOne',1);
4 fclose(fileID);
5
6 A = cell2mat(C);
7
8 frequency = -1*(A(:,3)*1e-9)/(24*60*60);
9
10 plot(A(:,1),frequency,'r')
11
12 mean_freq = mean(frequency)
13 stdev_freq = std(frequency)

```

Komentosarja 2: Jäljitettävyysslinkki B:n tiedon analysointiin käytetty Matlab-komentosarja.

```

1 % Testattavan laitteen ADEV.
2 sigma_dut = [1e-7 1e-8 1e-9 1e-10 1e-11];
3
4 % Mittausaika sekunteina.
5 meas_time = 2000;
6
7 ii = [3:1:meas_time];
8
9 for mm = 1:1:length(sigma_dut)
10     for nn = ii
11         i = 1:1:nn;
12         gg(nn-2,mm) = sigma_dut(mm)/sqrt(sum((i-(nn+1)/2).^2));
13     end
14     semilogy(ii,gg(:,mm))
15     hold on
16 end

```

Komentosarja 3: Matlab-komentosarja, jota käytettiin pistetaajuuksien mittausohjelman mittausajan arvioimiseen.